

*Cemagref
Centre de Recherche pour
l'Ingénierie de l'Agriculture
et de l'Environnement*

*THEMA
Théorie Economique,
Modélisation, Application
Paris X - CNRS*

*IRD
Institut de Recherche pour
le Développement*

THESE

Présentée par

Nicolas FAYSSE

pour obtenir le titre de Docteur de
l'Université de Paris X Nanterre
Spécialité : Economie

Sujet :

L'influence des règles collectives d'allocation de l'eau sur les choix stratégiques des agriculteurs

**Des petits périmètres irrigués tunisiens aux
prélèvements en rivière dans le bassin de l'Adour**

Soutenue le 13 décembre 2001
devant le jury composé de :

M. Jean-Marc BOURGEON	Co-directeur de thèse	Maître de Conférences à l'Université Paris X Nanterre
M. Patrick LE GOULVEN	Examineur	Directeur de recherche, directeur de l'unité DIVHA, IRD
Mme Sylvie MORARDET -FABRE	Examinatrice	Chercheur au Cemagref
M. Michel MOREAUX	Rapporteur	Directeur de recherche, professeur à l'Université Toulouse I
M. Pierre PICARD	Directeur de thèse	Professeur à l'Université Paris X Nanterre
M. Henri TARDIEU	Examineur	Directeur de la Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne
M. Jacques WEBER	Rapporteur	Directeur de recherche, chargé de mission au CIRAD

L'Université Paris X Nanterre n'entend donner aucune approbation ni improbation aux opinions émises dans cette thèse : ces opinions doivent être considérées comme propres à leur auteur.

“Les hommes d’el-Anjid racontent qu’au XIII^{ème} siècle, le docte et saint personnage Jridi Ibn Sabbat lui-même fut sollicité pour éclairer de ses conseils une réforme du mode de répartition de la source ;

mais, ajoutaient-ils non sans condescendance pour ce savant venu d’ailleurs, il dut y renoncer faute d’avoir pu le comprendre.”

*Une Communauté oasienne du Sud-Tunisien
G. Bédoucha (1984)*

Sommaire

Introduction	8
Un premier tour d’horizon	11
0.1 Du constat de pénurie d’eau à la négociation sur les règles d’allocation	11
0.2 Les différentes mesures de l’eau allouée	14
0.3 Les enjeux pour la gestion de l’eau abordés	17
0.4 Présentation des deux terrains d’étude	25
1 Question initiale de la thèse et voisinages théoriques	36
1.1 La question initiale	37
1.2 Position par rapport à l’analyse des ressources en bien commun	38
1.3 Position par rapport à l’analyse des instruments de gestion de l’eau	62
1.4 Liens avec la théorie des choix publics	63
1.5 Un plan de travail	63
1.6 Approche formelle du problème dans le cas d’une méconnaissance des caractéristiques individuelles	66
1.7 Utiliser la théorie des jeux ?	71
2 Répartir l’eau entre des agriculteurs qui la valorisent différemment	73
2.1 L’allocation optimale	76
2.2 Lorsque le Gestionnaire ne connaît pas les capacités individuelles à valoriser l’eau	77
2.3 Application au périmètre irrigué d’El Melalsa	90
2.4 Des compléments aux règles pour les rendre plus efficaces	95
2.5 Conclusion	97
2.6 Annexes du chapitre 2	98
3 Partager le risque par le biais de l’allocation en eau ?	112
3.1 Un modèle et des critères d’évaluation	117
3.2 Des règles d’allocation sans assurance extérieure	123
3.3 Des assurances extérieures au système irrigué	132
3.4 Evaluation des règles selon les critères prédéfinis	136
3.5 Applications sur l’Adour et en Tunisie	138
3.6 Conclusion	143
3.7 Conclusion sur les règles qui créent des interdépendances dans le cas d’une méconnaissance des caractéristiques individuelles	145
3.8 Annexes du chapitre 3	146

4	Lorsque le coût de vérification de l'allocation est important	153
4.1	Les règles de gestion de l'eau utilisées sur l'Adour et le Gabas	159
4.2	Evaluation du suréquipement et de l'irrigation stratégique	160
4.3	Un modèle pour l'irrigation stratégique	162
4.4	Analyse de la situation actuelle	168
4.5	Un mécanisme optimal pour des irrigants identiques et une information parfaite	170
4.6	Différents scénarios envisageables	171
4.7	Conclusion	175
4.8	Annexes du chapitre 4	177
5	Synthèse des approches et ouvertures théoriques	179
5.1	Synthèse des différentes approches étudiées	180
5.2	Prise en compte de la contrainte de production de l'eau	181
5.3	De la souplesse dans le système : allocations informelles et renégociations	186
5.4	Pourquoi observe-t-on des règles de type <i>ex post</i> ?	188
5.5	Quel impact de l'existence systématique d'une marge de manœuvre sur la bonne structure de gestion ?	188
5.6	Conclusion	197
6	Retour sur les terrains d'étude : quelques propositions	199
6.1	En Tunisie	200
6.2	Dans le bassin de l'Adour	203
	Conclusion	206
	Bibliographie	211
	Liste des tableaux	222
	Table des figures	224
	Abréviations	228
	Glossaire	229
	Index	233
	Annexes	233
A	Description des trois périmètres irrigués tunisiens	234
A.1	Méthode générale d'analyse	234
A.2	El Melalsa	237
A.3	Bled Abida	246
A.4	Souaidia	252
B	Présentation de l'Adour gersoïs et du Gabas	256
B.1	La partie du Gabas située dans les Pyrénées Atlantiques	256
B.2	L'Adour gersoïs	256

C Sleepi : un logiciel de simulation économique à l'échelle des périmètres irrigués	258
Table des matières	260
Résumé	265

Remerciements

Mes remerciements vont d'abord à Pierre Picard qui a fait le pari - un après-midi de février 1998, en une demi-heure - que ma thèse irait jusqu'au bout. Nos séances de travail ont été capitales pour extraire du "trop plein" de mes expériences de terrain des questions qui aient un tant soit peu un sens économique. Je dois également beaucoup à Jean-Marc Bourgeon, avec qui les réflexions sur les éléments sujets à caution -bancals ?- de mon travail furent passionnantes.

Je remercie aussi Patrick Le Goulven pour son enthousiasme communicatif, pour les discussions que nous pouvions avoir sur tout, à partir de rien, autour d'un tableau blanc à la maison de l'IRD à Tunis. Toutes mes excuses sur le fait que l'approche en théorie des contrats incomplets n'ait pas abouti..., dommage, ça sonnait bien ! Un remerciement aussi à toute l'équipe de MERGUSIE qui sait - entre autres - rendre si vivant l'étage des hydros à Tunis, et en particulier à Mohamed Salah Bachta.

L'équipe du Cemagref à Montpellier m'a si bien accueilli durant mes différents séjours que j'ai décidé d'y terminer ma thèse. Sylvie Morardet m'a suivi de façon constante depuis le "galop d'essai" du DEA, Thierry Rieu m'a permis d'entrer au Cemagref Montpellier..., et m'en a organisé la sortie.

Sur l'Adour, Daniel Boubée a toujours pris le temps nécessaire pour m'initier, depuis les finesses de la maîtrise d'ouvrage jusqu'aux subtiles négociations sur les débits d'étiage.

Je remercie Jacques Weber qui m'a suivi depuis la "maternelle" Engref et qui a accepté de bonne grâce que j'aille m'enfermer dans la tribu des néoclassiques.

Merci aussi à tous les "jeunes" qui ont travaillé avec moi en Tunisie ou sur l'Adour. Sophie Lardilleux, tout en sourires, même lorsque nous maudissions de concert Microsoft® Excel® ; les fous rires avec Mohamed Keffi, Olfa Souki et Até Koukou Tchamba lors de nos ballades sur le terrain. Mais aussi en France : Sophie Chevallier et Charles Mancuso m'ont sauvé de la torpeur et de la solitude du thésard en phase de grossesse.

Enfin, un grand merci à tous les agriculteurs qui m'ont accueilli sur le terrain, avec le café à tout heure, sur l'Adour (de quoi être sur les nerfs au bout du quatrième entretien de la journée), au thé *d'bnê* (de maçon) en Tunisie, ces petits verres de thé noir qui ressemblent plutôt à de la dynamite ! Une générosité et un sens de l'accueil..., qui ne transparaissent pas vraiment derrière mes "agents maximisant leurs profits" !

Introduction

Au Nord comme au Sud, le mot d'ordre actuel face aux problèmes de manque d'eau est avant tout de gérer l'existant, et de moins en moins de créer de nouvelles ressources. L'application de ce précepte à l'usage agricole se fonde sur les deux concepts clés actuels que sont la *réhabilitation* des périmètres irrigués et la *décentralisation* de leur gestion. Cette évolution est à l'œuvre alors que les besoins en eau continuent de croître, et ce quel que soit l'usage. En témoignent de nombreux articles de journaux intitulés par exemple "Menaces sur l'eau. Comment éviter une crise mondiale" (Science et Vie, 2000), ainsi que des ouvrages plus académiques qui étayent de quelques chiffres ce constat : on ne reviendra pas là-dessus¹.

Il faut donc mettre en place une gestion de la demande en eau. Que peut proposer l'économie de l'environnement ? Depuis un demi-siècle, les expériences de régulation d'un problème d'environnement ont fait émerger deux conclusions.

La première est qu'il est souvent illusoire de chercher à collecter toutes les informations, sur les agents comme sur l'écosystème, qui seraient en théorie nécessaires pour qu'un des outils de la boîte "Economie de l'environnement" permette d'atteindre l'optimum social.

La deuxième conclusion partage ce constat d'une inéluctable asymétrie de l'information : quel que soit le mécanisme de régulation mis en œuvre, les agents conservent toujours une liberté d'action qui leur permet, au mieux d'améliorer à la marge leur situation, au pire de contourner et de s'affranchir complètement du système de régulation. Puisqu'il est très coûteux et finalement inefficace de chercher toujours à se rapprocher le plus possible du monde de l'information complète, peut être est-il plus sage d'accepter de vivre dans un monde de second rang et de s'y construire d'autres références.

Le travail de thèse part de ces constats et de ce pari : si on accepte l'existence de ces marges de manœuvre comme consécutives, de façon plus ou moins importante, de toute règle de gestion de l'eau, il devient nécessaire de comprendre quel est réellement l'impact de ces marges de manœuvre sur l'efficacité de telle ou telle règle. Ce travail pourra alors peut-être mettre en lumière dans quelles conditions les règles "traditionnelles" de gestion de l'eau ne sont pas, après tout, si inefficaces.

On peut dresser ici un parallèle avec les théories générales sur l'allocation des ressources. Les marchés permettent d'obtenir n'importe quel état Pareto-optimal, enseigne le second théorème de l'Economie du Bien-Etre. Néanmoins, pour ce faire, il faut réaliser des transferts forfaitaires ; or, en situation d'asymétrie d'information, la mise en œuvre de ces transferts peut se révéler très problématique. Des mécanismes plus simples de

¹voir par exemple Feuillette (2001), Johansson (2000)

taxation peuvent alors permettre une allocation autant voire plus efficace (Guesnerie, 1995).

Dans la sphère des systèmes irrigués, trois formes de marges de manœuvre ont une grande influence sur la gestion de l'eau : le choix des surfaces mises en culture irriguée, du matériel de pompage et celui du calendrier d'irrigation. Ces marges de manœuvre créent des externalités entre agriculteurs. Le concept central qui sera utilisé pour évaluer les interactions qui en résultent est l'équilibre de Nash qui permet de caractériser les situations d'équilibre lorsque plusieurs agents jouent ensemble un jeu non coopératif. La thèse aurait pu s'appeler de façon plus poétique : Monsieur Nash au pays des systèmes irrigués...

Par ailleurs, il s'agit de sciences économiques : dans quelle mesure permettent-elles d'appréhender la question ?

La réalité d'un système irrigué, comme tout objet des sciences sociales, ressemble à la sculpture dessinée sur la couverture du livre *Gödel, Escher, Bach* de Hofstadter (1981) qui, selon le plan sur lequel on la projette, sera vue comme un G, un B ou un E. Chaque projection, chaque grille de lecture selon une science sociale, vient compléter la compréhension du système entier. La projection sur le plan Système Multi Agents - une modélisation dynamique d'agents en interactions entre eux et avec l'environnement - constituerait un très bon complément à ce travail !

De plus, les choix des irrigants sont étudiés *après* la négociation sur les règles de gestion, lorsque chaque agriculteur "retourne dans son champ" et effectue ses choix en fonction de la marge de manœuvre que la règle adoptée lui autorise. Dans ce contexte et sur les terrains étudiés, le calcul économique mené au niveau de l'exploitation est apparu comme un facteur déterminant des choix de l'agriculteur.

La recherche de thèse s'est appuyée sur deux études de terrain : des petits périmètres irrigués gérés par des associations d'irrigants en Tunisie d'une part et d'autre part le bassin de l'Adour, dans le Sud-Ouest de la France. Ces deux terrains sont chacun représentatifs d'un grand nombre de situations de pénurie dans le monde : d'un côté, la gestion du manque d'eau structurel au sein d'un petit groupe d'irrigants, de l'autre un bassin versant dont la taille pose des problèmes d'acquisition de l'information et pour lequel il faut trouver un équilibre entre l'agriculture et les autres usages.

Contexte économique, échelle, problèmes : les situations sont extrêmement différentes d'un côté et de l'autre de la Méditerranée. Il ne s'agit en aucune manière d'effectuer une comparaison mais plutôt de regarder comment une même question initiale se "lit" dans ces deux cas : les marges de manœuvre individuelles jouent un rôle crucial dans l'efficacité des règles de part et d'autre de la Méditerranée.

Le chapitre introductif de ce mémoire de thèse décrit brièvement les différentes formes et règles d'allocation utilisées de par le monde et présente de façon très qualitative la question de thèse ainsi que les deux terrains d'étude.

Le chapitre 1 pose de façon plus précise la question de thèse, puis propose un bilan de littérature sur l'analyse économique des ressources en bien commun. Cette revue de littérature permet d'y situer le sujet de la thèse. Enfin, l'approche formelle qui sera utilisée dans les deux chapitres suivants est présentée.

Les chapitres 2, 3 et 4 sont autant de sous-questions issues de la question initiale de thèse. Dans les chapitres 2 et 3, on considère que le Gestionnaire du périmètre

irrigué peut attribuer sans coût une allocation individuelle en eau à chaque agriculteur. L'allocation de l'eau ne pose problème, bien sûr, que si les agriculteurs diffèrent par une caractéristique qui n'est pas directement accessible au Gestionnaire.

Le chapitre 2 s'intéresse plus spécifiquement au cas où les agriculteurs diffèrent par leur capacité à valoriser l'eau, soit parce qu'ils n'ont pas la même compétence, soit parce qu'ils utilisent un réseau d'irrigation qui connaît des pertes. Différentes règles sont déterminées et comparées dans un contexte déterministe : les agriculteurs connaissent le volume qui pourra être partagé pendant la saison d'irrigation. Une application est ensuite faite sur un des périmètres irrigués étudiés en Tunisie.

Le chapitre 3 aborde le cas où les agriculteurs diffèrent par leur aversion au risque. Le volume collectif à partager n'est pas connu au départ avec certitude, la question est alors de voir comment l'allocation d'une ressource en bien commun peut être utilisée pour partager le risque global sur le volume collectif.

Dans de nombreux cas, il est en fait coûteux d'acquérir l'information nécessaire pour définir puis contrôler une allocation de l'eau individuelle. Dans le chapitre 4, le Gestionnaire doit alors chercher la meilleure forme d'allocation collective de l'eau. Ce chapitre s'appuie pour l'essentiel sur l'exemple de deux sous-bassins du bassin de l'Adour. Une première partie caractérise les interactions stratégiques qui existent dans ces régions du fait d'une allocation collective de l'eau ; le travail est ensuite complété par une évaluation de l'impact potentiel de nouvelles règles visant à limiter ces interactions.

Le chapitre 5 constitue une ouverture de la question de thèse. Le cadre d'étude s'élargit d'abord au cas où le Gestionnaire peut choisir la quantité d'eau produite. Une seconde ouverture porte sur la façon dont les résultats des chapitres précédents peuvent s'intégrer dans l'analyse de la négociation sur le choix des règles et sur le niveau optimal de décentralisation.

Enfin, le chapitre 6 se veut un retour pragmatique sur le terrain : comment les solutions proposées dans les chapitres précédents peuvent-elles réellement être mises en œuvre, quels autres outils que les règles de gestion de l'eau peuvent être utilisés pour répondre au problème initial.

Un glossaire p. 229 propose quelques brèves définitions : des termes concernant la gestion de l'eau pour les économistes qui ne connaîtraient pas ce sujet, ainsi que des termes d'économie pour les "pratiquants" de la gestion de l'eau. Ces quelques mots sont indiqués, lors de leur première apparition, par un astérisque. Par ailleurs, cette thèse est aussi l'occasion d'une revue de littérature assez large sur les différentes expériences de gestion de l'eau dans le monde : un index permet de trouver les références concernant un pays donné.

Un premier tour d'horizon

Get off this estate ! What for ? Because it's mine. Where did you get it ? From my father. Where did he get it ? From his father. And where did he get it ? He fought for it. Well, I'll fight you for it.
(Carl Sandburg, *The People, Yes*, 1964
cité par Colby, 1995)

Résumé du chapitre

Lorsqu'apparaît un problème de pénurie d'eau dans un système irrigué, la mise en place d'une gestion négociée de l'eau nécessite un processus en trois étapes : (i) les acteurs se réunissent et s'accordent sur une vision commune de la ressource, (ii) ils négocient une règle d'allocation et de taxation, (iii) enfin, chacun agit individuellement en fonction de la marge de manœuvre dont il dispose compte-tenu de la règle adoptée.

La règle choisie va répartir l'eau disponible sous forme d'une allocation en volume, en temps, en débit, ou une combinaison des précédentes, le choix étant effectué en fonction du type de ressource en eau.

Le contexte est celui d'un système irrigué pour lequel la demande en eau est supérieure à la ressource disponible. Dans ce contexte, le travail de thèse cherche à comprendre quelle est l'efficacité des règles d'allocation et de taxation lorsqu'on prend en compte l'impact des actions individuelles décidées par les agriculteurs en réaction à la règle adoptée. Lorsque les règles donnent la possibilité d'interactions stratégiques entre agriculteurs, les choix résultants de ces interactions seront représentés par des équilibres de Nash.

Le travail de recherche s'est appuyé sur deux terrains : de petits périmètres irrigués gérés par des associations d'usagers en Tunisie et le bassin de l'Adour, dans le Sud-Ouest de la France.

0.1 Du constat de pénurie d'eau à la négociation sur les règles d'allocation

Partout dans le monde, on observe une demande en eau de plus en plus importante, et ce pour tous les usages : l'eau potable, l'irrigation ou encore le débit garanti pour l'environnement. De plus, mobiliser de nouvelles ressources coûte de plus en plus cher : il devient nécessaire de garantir l'adéquation entre ressource et usages en agissant en priorité sur la demande (Winpenny, 1997). L'irrigation constitue le principal élément de cette demande ; elle est aussi vouée à le rester dans les années à venir.

L'impact d'une allocation de l'eau sur l'environnement peut être déterminé directement par des analyses en microbiologie, en écologie, etc. De même, il est possible d'évaluer la courbe de demande en eau potable d'un groupe d'habitants en fonction du mode de tarification. En revanche, l'impact d'une règle d'allocation et de taxation de l'eau pour l'irrigation est beaucoup plus complexe à déterminer car les agriculteurs, face à cette règle, ont souvent les moyens de déployer des stratégies très diverses, en termes de surfaces mises en culture irriguée, de matériel d'irrigation utilisé ou de calendrier d'irrigation.

L'étude se place ici dans le cadre d'un **système irrigué** quelconque, i.e. *un ensemble constitué par une ressource en eau et ses usages, dont le plus important est l'irrigation*. Un système irrigué peut s'inscrire dans ce sens aussi bien dans un bassin versant que dans un périmètre irrigué.

Pour structurer les interactions entre règles d'allocation et usagers, on peut différencier trois étapes lors de l'apparition d'un problème de gestion quantitative de l'eau, dans un système irrigué et lorsque les usagers prennent part au choix des règles de gestion de l'eau (fig. 1).

◦ La création d'un référentiel de discussion commun

Lorsqu'il existe différents usages ou lorsque le système irrigué est important, les usagers doivent d'abord s'entendre sur une description commune à la fois de la ressource et des usages.

Au terme de cette étape, un référentiel commun existe sur le problème à gérer et les objectifs à atteindre, les parties concernées et la situation initiale des droits d'usage. Cette phase peut prendre beaucoup de temps. Dans le bassin versant de l'Adour, il a fallu ainsi plusieurs années de discussions entre usagers à l'amont et à l'aval pour que chacun révise une position initialement assez caricaturale des autres et que puisse se construire une vision commune du bassin (Faÿsse, 1998). Sur l'Arc, une rivière des Bouches-du-Rhône, il faudra attendre une quinzaine d'années pour que se construisent, face à un problème initial d'inondation, un constat et des objectifs partagés par l'ensemble des parties concernées (Le Bourhis, 1996).

◦ La négociation de scénarios

Une fois ce référentiel partagé, différents scénarios sont envisageables. Par exemple, sur l'Adour, les acteurs ont discuté des volumes dédiés à l'environnement et à l'agriculture ainsi que de la construction des barrages.

Si l'espace de négociation est suffisamment formalisé, celle-ci peut être alors modélisée (par exemple des modèles de votes ou de jeux tels que celui de Thoyer et al., 2001). Cette étape est appelée par la suite étape de "choix des règles".

A la fin de cette étape, il est nécessaire que les règles d'allocation et de taxation soient déterminées, mais aussi la distribution initiale des droits, les mécanismes de contrôle et de sanction, et enfin les mécanismes d'adaptation du système (Weber, com. pers.).

◦ Prise en compte des règles collectives dans les stratégies individuelles

Dans la majeure partie des situations, ces règles laissent une marge de manœuvre aux agriculteurs. Nous entendons par **marge de manœuvre** *la possibilité qu'a l'agriculteur d'effectuer un choix de façon autonome dans le cadre des règles en application*. Ce choix porte le plus souvent sur la surface irriguée, le type de culture ou de matériel ou encore le calendrier d'irrigation. Suivant le cas, ce choix sera observable par l'institution

responsable de l'allocation de l'eau (surface mise en culture par exemple) ou non (un prélèvement en rivière).

Dans certains cas, les choix des agriculteurs n'ont pas d'impact sur la répartition du volume collectif entre les différents usagers. Par exemple, des agriculteurs passent à la micro-irrigation dans un périmètre irrigué au Brésil pour pouvoir irriguer une surface plus grande en conservant leur allocation initiale en eau (Fernandez, 2001b)².

Dans d'autres cas, ces règles créent des interactions : les choix de certains agriculteurs influent sur l'allocation d'eau pour d'autres agriculteurs. A cette étape, les agriculteurs agissent donc individuellement en fonction de ce qui a été négocié à l'étape précédente, leur choix stratégique peut donc être modélisé en terme de théorie des jeux non coopératifs. Cette étape est nommée par la suite étape d'"application des règles".

Etape 1 : création d'un référentiel

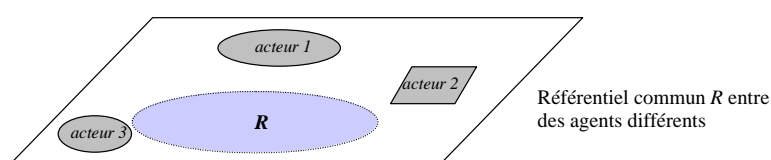
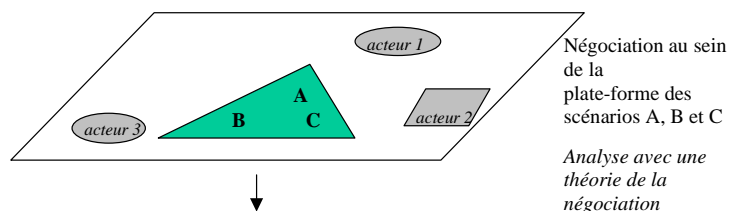


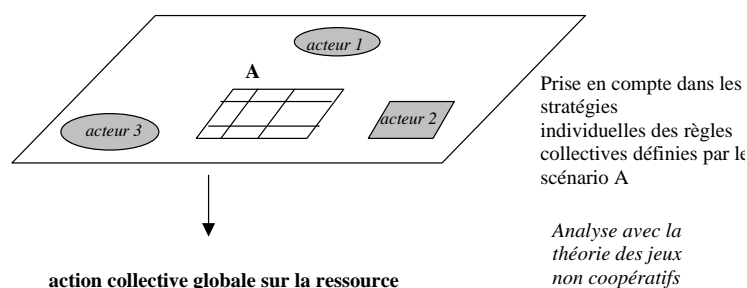
plate-forme commune de scénarios négociables

Etape 2 : choix des règles



adoption d'une règle collective

Etape 3 : application des règles



action collective globale sur la ressource

FIG. 1 – les étapes de définition et de mise en œuvre des règles de gestion de l'eau

Par ailleurs, lorsque le choix des règles de gestion de l'eau se fait de façon centralisée par l'Etat, seule l'étape 3 d'application des règles existe.

²Même si l'allocation en volume reste constante, il faut néanmoins modifier le tour d'eau* de façon à prendre en compte la périodicité différente entre irrigation au goutte-à-goutte et irrigation en gravitaire.

Par la suite, le terme de **Collectivité** désignera *l'institution qui décide des objectifs à réaliser, quel que soit le niveau de (dé)centralisation* : commission d'usagers, administration du Ministère de l'Agriculture, etc. La Collectivité sera distinguée du **Gestionnaire**, qui lui est *l'autorité responsable de mettre en œuvre les objectifs que la Collectivité a fixés, en choisissant les règles les plus adaptées puis en les mettant en application* : aiguadier*, compagnie de gestion d'une retenue, société étatique de mise en valeur, etc.

0.2 Les différentes mesures de l'eau allouée

Toute règle d'allocation et de taxation s'appuie sur une mesure de la quantité d'eau allouée, quantité qui peut être exprimée en temps, en débit ou en volume suivant les contraintes techniques existantes³.

0.2.1 L'allocation en temps

L'allocation en temps correspond à une autorisation de pompage ou de dérivation donnée à l'agriculteur pour une durée donnée. Le débit réellement prélevé n'est pas nécessairement connu, notamment lorsque le Gestionnaire manque d'information sur le débit exact qu'il fait transiter par les canaux ou bien sur la capacité de pompage ou de dérivation de l'agriculteur.

Le premier cas correspond par exemple au système *warabandi**, utilisé en Inde et au Pakistan. Chaque agriculteur a le droit d'utiliser tout le débit du canal tertiaire, pendant une durée déterminée, et ce quel que soit le débit qui entre réellement dans le canal tertiaire. Au niveau supérieur, les canaux secondaires (*distributaries*) reçoivent tous une fraction du débit du canal principal en situation normale. Lorsque le canal principal est moins alimenté en eau, en revanche, un tel partage entre canaux secondaires n'est plus possible car alors les faibles débits provoqueraient un envasement. L'administration du périmètre irrigué bascule alors vers un tour d'eau entre canaux secondaires, i.e. une allocation en temps (Strosser, 1997).

Le système de contrôle départemental des prélèvements, en France, correspond de fait au deuxième cas. De fait, car si les agriculteurs doivent en théorie obtenir l'autorisation pour une certaine capacité de prélèvement dans la rivière en début de campagne, en pratique l'administration ne contrôle jamais leur capacité. Les agriculteurs peuvent donc choisir la puissance de leur équipement de pompage : le choix du niveau d'équipement correspond alors à un équilibre entre le gain en sûreté de prélèvement et les coûts d'achat et d'entretien.

0.2.2 L'allocation en volume

L'allocation en volume est généralement définie pour une période longue : l'année ou la saison d'irrigation. **Cette mesure est d'autant plus intéressante que la valeur exacte de la ressource qui sera disponible pendant la campagne est connue en début de campagne.**

³Pour une présentation de ces différentes formes d'allocation de l'eau, voir aussi Montginoul (1997)

Lorsque le système délivre à la borne un débit donné, l'allocation en volume et celle en temps sont équivalentes. Cependant, dans la plupart des cas, le débit à la borne n'est jamais complètement maîtrisé : ainsi, sur les périmètres irrigués en basse pression en Tunisie, le débit à la borne varie selon les positions des différents agriculteurs qui irriguent simultanément à cause des baisses de charge : un compteur permet alors de savoir ce dont chaque agriculteur a pu réellement disposer.

L'allocation en volume est utilisée dans les Associations Syndicales Autorisées (ASA*) alimentées à partir d'un lac collinaire, comme celle de Boeilh-Boeilho-Lasque sur le Gabas (Pyrénées Atlantiques). Sur de nombreuses petites rivières des Deux-Sèvres et de la Vienne, est mis en place un système de quotas en volume hebdomadaires en fonction du débit de la rivière (Baraton, 2001, Allain, 2000). Sur un affluent de l'Adour, l'Arros, une situation structurelle de pénurie a conduit les agriculteurs à se suréquiper pour pouvoir s'affranchir d'un système initial de restrictions de prélèvement équivalent à une allocation en temps. Lorsque le barrage de l'Arrêt-Darré a permis la réalimentation de la rivière, la Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne (CACG) n'a pu obtenir la mise en place de contrats définis avec une autorisation en débit comme sur le système Neste*, à cause de ce suréquipement. Ce bassin est donc actuellement géré avec l'ensemble des méthodes utilisées sur le système Neste mais avec un quota en volume uniquement.

En France enfin, de façon générale, on peut estimer que les compteurs seront installés dans un délai de deux à trois ans ; ils permettent de définir un quota en volume à l'hectare :

- soit par affluent (1500 m³ sur le Louet, dans le bassin de l'Adour) ;
- soit par département (1000m³/ha en Pyrénées Atlantiques) ;
- soit les deux (Arros gersois 1900m³/ha, Arros Haut-Pyrénéen 2100m³/ha) ;
- et éventuellement par type de sol, tel que sur le bassin Son-Sonnette en Charente (Allain, 2000) mais le coût d'acquisition de l'information peut s'avérer important.

0.2.3 L'allocation en débit

L'allocation en débit peut être définie de deux façons :

◦ de façon nominale

L'allocation est établie soit par la structure du réseau même (les modules des périmètres irrigués) soit de façon administrative, en France, lorsque le prélèvement est effectué par des pompes individuelles en rivière.

◦ proportionnellement à la ressource

Pour une ressource très variable comme une rivière non réalimentée, on peut définir des droits de prélèvement proportionnels au débit de la rivière. C'est par exemple le cas de droits historiques de dérivation de canaux en France tels que l'Alaric, dans les Hautes-Pyrénées, qui peut prélever en théorie un tiers du débit de l'Adour (Faÿsse, 1998).

Si cette mesure de l'eau allouée permet de répartir sans difficulté une ressource variable, en revanche elle s'appuie sur des limitations physiques (diamètre des canaux) ou d'équipement en matériel de pompage. Par conséquent, il peut se révéler difficile de modifier la répartition en débit entre les différents usagers.

0.2.4 Combinaisons des précédentes mesures de l'eau allouée

Les combinaisons entre différentes mesures consistent rarement en une association systématique de deux types d'allocation mais plutôt en un basculement d'un type à l'autre en fonction de l'évolution des contraintes pesant sur le système irrigué.

Débit et volume

La CACG utilise à la fois un quota en débit et un quota en volume. En année normale, le facteur limitant pour les agriculteurs est le quota en débit ; il permet à la CACG de mieux gérer le maintien d'un débit à l'aval des points de prélèvement. En année de crise, lorsque les barrages ne sont pas suffisamment pleins, le quota en volume permet de répartir la pénurie entre agriculteurs.

Les deux quotas ne sont donc pas simplement superposés mais sont utilisés de façon complémentaire en fonction de la contrainte technique principale dans le système.

Débit et temps

L'utilisation de ces deux formes d'allocation simultanément est équivalente à une allocation en volume.

L'allocation en débit permet d'empêcher le suréquipement qui risque d'apparaître en cas de seule utilisation d'un quota en temps. L'allocation en débit sert alors de cadre général pour la répartition de l'eau, l'allocation en temps étant ensuite modulée en fonction de l'équilibre à atteindre en cours de campagne. De plus, le couplage de ces deux allocations permet de réaliser une allocation en volume sans devoir investir dans des compteurs volumétriques (Montginoul, 1998).

Le système de gestion préfectorale des prélèvements est fondé sur cette combinaison : chaque agriculteur reçoit en début de campagne une autorisation en débit à laquelle viennent s'ajouter, en cas de crise, des interdictions de prélèvement équivalentes à des quotas en temps.

Temps et volume

La combinaison de ces deux mesures est rare. A titre d'exemple, cette combinaison est utilisée dans les ASA en gestion volumétrique, telles que Boeilh-Boeilho-Lasque, dans les Pyrénées Atlantiques : les agriculteurs doivent gérer à la fois un quota d'eau pour l'ensemble de la campagne et des tours d'eau sur les bornes d'irrigation utilisées par plusieurs agriculteurs.

0.2.5 L'allocation pluriannuelle

Dans certains cas, le Gestionnaire propose aux agriculteurs de pouvoir reporter la consommation de la part non utilisée de leur quota sur l'année suivante. Ce mécanisme d'épargne permet d'inciter l'agriculteur à tenir une conduite économe de l'eau tout en conservant le système de quota. Il est ainsi utilisé sur le périmètre Big Thompson dans le Colorado depuis 1986 : les agriculteurs peuvent consommer la part non utilisée une année pendant l'année suivante, entre le premier avril et le 15 juillet (Michelsen, 1994). Ce mécanisme de report permet aussi d'adapter un système de quotas rigide à la variabilité sur le climat et la ressource : dans le système nouvellement installé pour réguler les prélèvements dans la nappe de la Beauce, un agriculteur peut dépasser ou reporter jusqu'à 20% une année son quota, à condition que sur trois ans le total soit constant (Hanot, 1999).

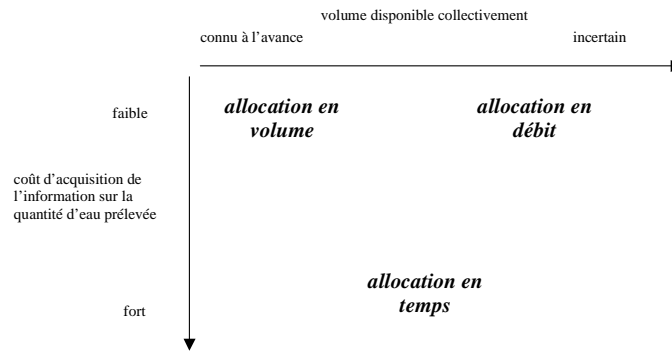


FIG. 2 – pertinence des différentes mesures de l'allocation en l'eau en fonction de la variabilité de la ressource et du coût d'acquisition de l'information

0.2.6 Conclusion

Pour conclure, deux caractéristiques permettent de déterminer l'intérêt des différentes formes d'allocation de l'eau : la variabilité de la ressource en eau et le coût d'acquisition de l'information. La figure (2) propose de classer les trois précédentes formes d'allocation en fonction de ces deux paramètres.

Par ailleurs, ces différentes mesures possibles ne doivent pas être systématiquement assimilées à des quotas. Les quotas se situent en fait à un autre niveau, celui de la règle d'allocation : en plus des quotas, où le niveau d'allocation et le prix sont fixés, ces différentes mesures peuvent être utilisées pour mettre en œuvre une tarification, un marché, etc.

0.3 Les enjeux pour la gestion de l'eau abordés

Cette section propose une présentation générale et qualitative du contexte et des objectifs de la recherche effectuée. La définition plus formelle de la question de thèse et des hypothèses faites sera effectuée au chapitre suivant.

Quels objectifs généraux pour la gestion de l'eau ?

Gérer une ressource en eau, c'est chercher la meilleure adéquation possible entre une ressource en eau et une demande. De façon générale, les instruments de gestion de l'eau sont utilisés pour atteindre tout ou partie des trois objectifs suivants :

- une valorisation de l'eau efficace : l'allocation entre les usagers est Pareto optimale et le coût marginal de production de l'eau égale sa valorisation marginale par les usagers ;
- l'équilibre budgétaire : les coûts de production sont payés par les usagers ;
- éventuellement l'équité et la redistribution de revenus.

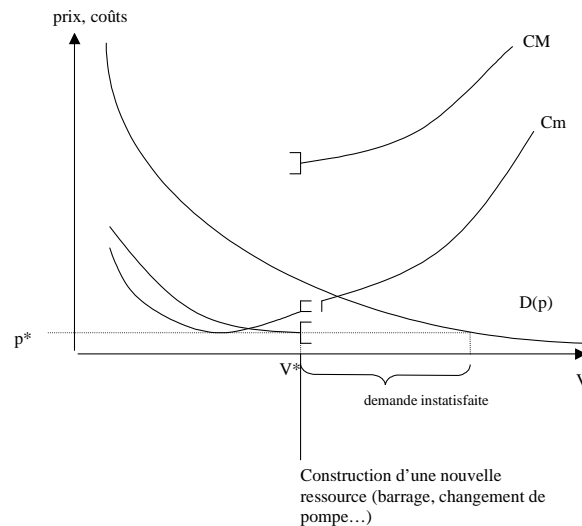


FIG. 3 – demande en eau insatisfaite du fait de la non continuité de la fonction de coût (CM coût moyen ; Cm coût marginal ; $D(p)$ demande en eau en fonction du prix)

Le cas d'une demande en eau supérieure à l'offre

De nombreux systèmes irrigués sont conçus pour desservir un nombre maximal d'agriculteurs, dans un objectif social, quitte à prévoir dès le départ que le système ne pourra pas apporter toute l'eau potentiellement nécessaire (Jurriëns et Mollinga, 1996, Mollinga et van Straaten, 1996). De plus, dans de nombreux cas dans le monde, les systèmes irrigués connaissent depuis plusieurs années une augmentation de la demande et doivent désormais gérer avant tout la pénurie d'eau. Ainsi, au Pakistan, les réseaux avaient été conçus pour un taux d'intensification de 50 à 70% dans un objectif de lutte contre la famine. Depuis un siècle, l'agriculture est devenue progressivement plus intensive : actuellement le taux moyen est de 120% (Strosser, 1997).

L'étude se place ici dans le cas où une tarification assurant l'équilibre budgétaire du Gestionnaire ne permet pas d'équilibrer offre et demande : **une partie de la demande en eau n'est pas satisfaite**. Pourquoi ne pas alors augmenter la quantité d'eau produite ?

Quatre scénarios permettent d'expliquer l'existence - fréquente - d'une demande en eau insatisfaite.

La fonction de coût de production n'est pas continue

Par exemple, les quelques barrages sur une rivière assurent un débit insuffisant pour satisfaire la demande, lorsque celle-ci paie le coût complet de l'eau produite. En revanche, les usagers ne peuvent pas contribuer suffisamment pour permettre la construction d'une nouvelle retenue (fig. 3).

C'est aussi le cas des petits périmètres irrigués en Tunisie : bien qu'en situation de manque d'eau, les agriculteurs n'ont pas assez d'argent pour collectivement acheter une pompe plus puissante pour prélever dans la nappe.

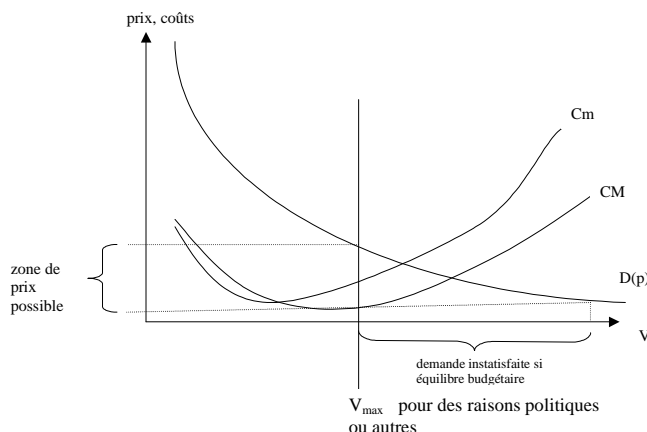


FIG. 4 – demande en eau insatisfaite du fait d'une impossibilité politique d'augmenter la ressource

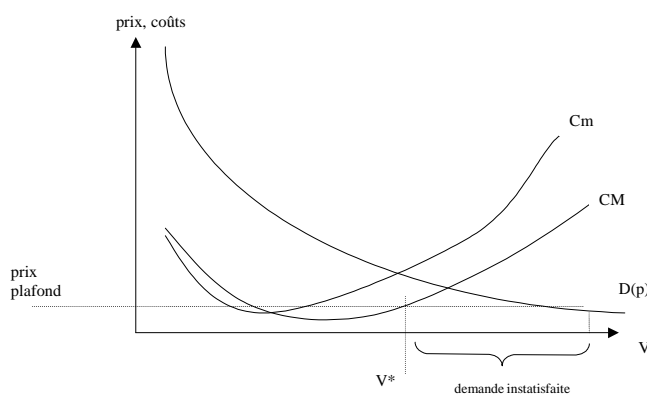


FIG. 5 – demande en eau insatisfaite du fait de l'existence d'un prix considéré comme plafond par les usagers

Les usagers n'ont pas la possibilité politique ou l'autorisation administrative d'augmenter la ressource

Le projet d'adduction d'eau du Rhône à Barcelone n'est pas autorisé actuellement pour des raisons politiques et non économiques, la rentabilité du projet étant assurée à court terme (fig. 4).

Les usagers refusent de payer au-dessus d'un prix plafond

Il existe de nombreux bassins en France où, malgré une situation de pénurie, les agriculteurs refusent de payer plus cher pour obtenir une quantité plus importante d'eau. A l'heure actuelle, en France comme presque partout dans le monde, il n'est pas politiquement envisageable de faire payer aux agriculteurs le coût complet de mobilisation et d'entretien de la ressource collective en eau utilisée par l'irrigation (fig. 5).

La demande a augmenté sur le court terme

La demande a augmenté trop vite pour que le Gestionnaire puisse investir dans de nouvelles ressources permettant d'équilibrer de nouveau ressources et demande.

Dans les trois chapitres principaux de la thèse (2, 3 et 4), nous nous limitons au cas où **le volume de ressource disponible ne peut être modifié par les usagers**, qu'il soit connu de façon sûre (pompage dans un aquifère) ou qu'il soit incertain (rivière sans retenue en amont). En ce sens, ce travail prend surtout son sens dans une analyse de court terme, lorsqu'on considère que les infrastructures techniques sont données.

Par ailleurs, ce problème existe pour n'importe quelle ressource renouvelable pour laquelle la valorisation individuelle dépend d'un investissement - ou effort - initial (forêt, pêche...) et lorsque les capacités d'investissement des acteurs excèdent la ressource disponible.

Quelle gestion pour cette situation ?

La croissance des usages se produit en même temps qu'un vaste mouvement de décentralisation de la gestion à des associations d'irrigants. Ces associations sont désormais autonomes dans leur choix de règles d'allocation de l'eau.

Il est important de comprendre comment se structure le lien entre les règles collectives d'allocation de l'eau et la demande en eau, par le biais des choix individuels des agriculteurs face à ces règles.

La recherche a débuté avec l'objectif suivant : **caractériser l'efficacité des différents outils d'allocation en prenant en compte la façon dont les agriculteurs vont se comporter *ex post* face à ces outils.**

Par la suite, on ne prend en compte que le comportement de l'agriculteur qui respecte les règles collectives :

- il existe d'une part des règles que le Gestionnaire peut contrôler sans effort de façon complètement efficace et pour lesquelles on considère qu'il n'y pas de fraude ;
- les règles dont le Gestionnaire ne peut contrôler le respect correspondent simplement à une marge de manœuvre supplémentaire.

Les décisions prises par des agriculteurs irrigants sont :

- sur un horizon de plusieurs années, l'équipement d'irrigation (niveau *stratégique*) ;
- au pas de temps de l'année, les types de culture et l'étendue des surfaces semées (niveau *tactique*) ;
- pendant la campagne d'irrigation, les fréquences d'arrosage et les doses apportées (niveau *opérationnel*).

De nombreuses règles répartissent l'eau en fonction des choix effectués par les agriculteurs. En raison de la contrainte sur le volume global à répartir, ces règles vont créer une interdépendance entre les choix des agriculteurs. Un agriculteur va donc prendre en compte les choix des autres dans ses propres choix : on parlera d'interactions stratégiques. Si on s'intéresse aux équilibres possibles résultant de ces interactions, **une condition nécessaire est celle de "non-regret" : à l'équilibre, aucun acteur n'a intérêt à changer de stratégie unilatéralement. Cette condition définit un équilibre de Nash***, notion qui sera utilisée pour caractériser les équilibres dans l'ensemble du document. Des conditions de convexité assurent en général l'existence d'au moins un équilibre entre les actions des joueurs. En revanche, une situation d'interactions - un jeu - possède souvent de nombreux équilibres de Nash et une partie importante de la théorie des jeux non coopératifs est consacrée à effectuer une sélection au sein de cet ensemble d'équilibres.

L'objet du travail est donc de **déterminer l'efficacité d'une règle, en considérant que la réponse des agriculteurs est un équilibre de Nash.**

L'efficacité d'une règle d'allocation et de taxation sera jugée en fonction des trois objectifs adaptés à notre contexte :

- la valorisation collective maximale de l'eau⁴ ;
- l'équité et la capacité à effectuer par le biais de la ressource une redistribution ;
- un éventuel partage du risque lorsque la ressource collectivement disponible est incertaine.

Les meilleures règles d'allocation de l'eau seront caractérisées en fonction des paramètres du système :

- le niveau d'incertitude sur la ressource ;
- l'hétérogénéité des agriculteurs (capacité à valoriser la ressource, capacité d'investissement, aversion au risque)
- l'existence de mécanismes d'assurance extérieurs au système irrigué.

Une typologie des règles d'allocation de l'eau

Face à un problème d'allocation d'une ressource limitée, l'allocation de référence, d'un point de vue économique, est le marché de l'eau. Il permet d'atteindre un état Pareto-efficace, à la fois en univers certain et en univers incertain avec les marchés contingents complets (Gollier, 1999).

Les marchés ont été utilisés dans des systèmes anciens, dans les oasis tunisiennes (Bédoucha, 1984), en Espagne (Ostrom, 1992) ou encore en Angleterre au XVIII^{ème} siècle (Scott et Coustalin, 1995). Des systèmes modernes permettent l'utilisation d'un marché sur des surfaces plus importantes, que ce soit avec des droits en débits au Chili (Bauer, 1997) ou sur des volumes aux Etats-Unis (Montginoul, 1997)⁵.

Cependant, de façon générale, **même dans un contexte de rareté, les marchés de l'eau sont rares**, et ceci pour plusieurs raisons.

- o L'eau est souvent considérée comme **un bien ne pouvant être vendu et acheté**. C'est le cas, par exemple, pour certains périmètres irrigués au Kenya (Gillingham, 1999).
- o **Les droits d'eau ne sont pas assez bien définis** ou ne sont pas reconnus par l'Etat.

Bauer (1998) estime que les marchés de l'eau au Chili ont abouti en partie à un échec parce que le Code des Eaux de 1981 qui a permis ces marchés n'a pas pris en compte la complexité des droits d'eau, et notamment l'existence d'usages non consommateurs (par exemple, les centrales hydroélectriques). Aux Etats-Unis, de même, un des principaux freins à l'application des marchés d'eau dans l'Ouest américain est que les droits d'eau ne sont définis que pour les usages consommateurs et qu'il n'y a pas de prise en compte juridique de l'impact d'un transfert de droit d'eau sur les usages non consommateurs (Griffin et Hsu, 1993).

⁴Souvent, le terme d'*efficacité* se réfère à cet unique objectif. Nous préférons l'utiliser dans le sens de satisfaction d'objectifs définis *ex ante*.

⁵Une littérature très riche existe sur les marchés de l'eau aux Etats-Unis. Pour une bibliographie, on pourra se reporter à Dudley (1992) et au numéro 37 (1997) du *Natural Resources Journal*.

Bédoucha (1984) décrit comment l'Etat français a refusé de reconnaître les droits d'eau traditionnels dans les oasis du Sud tunisien et a détruit les différentes formes de marché existantes.

- **Les coûts de mise en place peuvent être très importants.**

En raison de ces coûts, le marché peut ne pas être l'allocation qui donne la valorisation maximale de l'eau.

- **La collectivité a d'autres objectifs que celui de la valorisation de l'eau, à travers l'allocation (partage du risque, redistribution sociale, etc.).**

Pour Bowen et al. (1991), la mise en place de droits individuels transférables à Hawaï créerait une rente de situation pour les agriculteurs, qui pourraient vendre très chers leurs droits d'eau aux villes, rente qui n'est pas justifiée selon eux.

D'un point de vue plus théorique, si on suppose que la Collectivité cherche à maximiser la fonction de bien-être $\int u(V(\theta), \theta) d\mu$, où V est le volume distribué et θ une caractéristique des individus, l'optimum peut être atteint par un marché couplé à des transferts forfaitaires qui dépendent de θ (deuxième théorème de l'économie du bien-être). Lorsque la Collectivité ne connaît pas ces caractéristiques individuelles, la solution précédente n'est plus possible et, dans une analyse de second rang, des solutions intéressantes peuvent être des mécanismes de taxation ou de révélation (Guesnerie, 1995).

Pour ces raisons, la Collectivité va presque toujours faire appel à d'autres règles que le marché pour répartir la ressource en eau. Il est d'abord possible d'établir **une distinction entre les règles qui autorisent une certaine marge de manœuvre laissée aux agriculteurs, et celles qui n'en laissent pas**. Ces marges de manœuvre peuvent porter, par exemple, sur **la surface mise en culture irriguée, le matériel de prélèvement d'eau, ou encore la conduite de l'irrigation en cours de campagne**.

Il est ensuite possible d'affiner la définition des règles autorisant des marges de manœuvre, en distinguant **les règles qui créent des interdépendances entre les agriculteurs, et celles qui n'en créent pas**. L'interdépendance consiste ici à ce que le choix d'un agriculteur (dans le cadre de la marge de manœuvre dont il dispose), va influencer sur l'eau reçue par d'autres agriculteurs.

La figure (6) présente cette double typologie : les distinctions sont schématisées par un dégradé de couleur car les règles peuvent autoriser une marge de manœuvre plus ou moins importante, ou de même créer des interdépendances plus ou moins fortes.

Par la suite, nous appellerons **règles *ex ante* la famille de règles qui ne créent pas d'interdépendances, c'est-à-dire que chaque agriculteur va obtenir une fraction donnée du volume, indépendamment de ses choix et de ceux des autres agriculteurs**.

Il n'y a alors pas d'interactions stratégiques entre les agriculteurs mais il existe alors des différences *ex post* de valorisation de l'eau.

C'est le cas du système *warabandi* utilisé au Pakistan et en Inde et mis en place au siècle dernier par les Britanniques dans un objectif d'équité : chaque agriculteur reçoit l'eau pendant une durée proportionnelle à sa surface possédée et donc indépendante de la surface qu'il a réellement mise en culture (Chaudry et Young, 1990). Il existe aussi

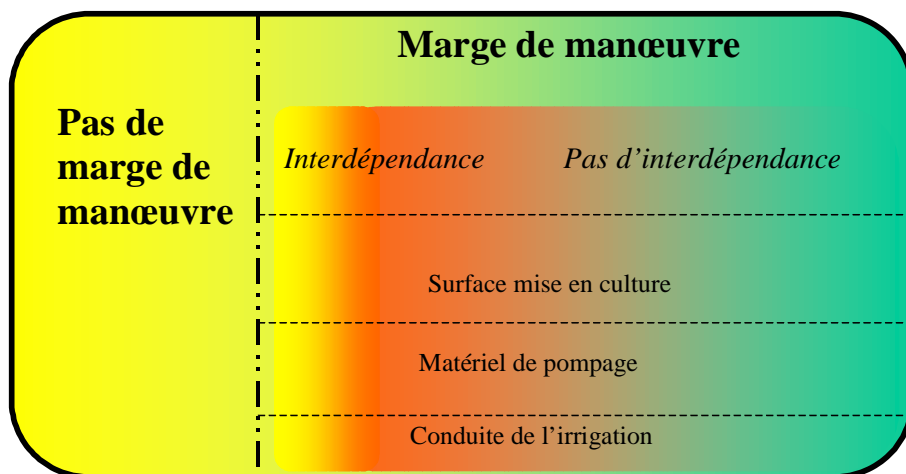


FIG. 6 – une typologie des règles d'allocation de l'eau

des allocations *ex ante* en temps d'irrigation par personne, à Haïti (Le Gentil, 1986) ou en Tanzanie (Gillingham, 1999, Potkanski et Adams, 1998).

Les autres règles, celle qui créent des interdépendances, sont appelées ici les règles *ex post* : elles allouent l'eau à chaque agriculteur en fonction des choix effectués, la règle prépondérante consistant à attribuer un volume proportionnel à la surface mise en culture.

A titre d'exemple, dans les périmètres irrigués de la Tunisie Centrale, des arbitrages collectifs sont effectués en faveur des cultures maraîchères d'été, considérées comme prioritaires par rapport aux cultures d'hiver. De plus, dans l'un d'entre eux, le périmètre d'El Melalsa, chaque agriculteur peut irriguer autant qu'il le désire une fois qu'il a la main d'eau*. La durée du tour d'eau est alors celle qui permet d'irriguer suffisamment une fois tous les champs du périmètre. Chaque hectare est ainsi irrigué à chaque fois de façon suffisante avec pour périodicité celle du tour d'eau et donc dépend de la surface mise en culture sur l'ensemble du périmètre (Faÿsse, 2000).

Sur 23 petits périmètres irrigués des Philippines étudiés par Schlager et al. (1994), 30% utilisent un tour d'eau sans limite individuelle de temps, i.e. de type *ex post*, et 56% utilisent un tour de type *ex ante*, soit avec une allocation en temps soit avec une allocation en portion du débit.

Si les règles *ex post* permettent une bonne valorisation de l'eau à assolement collectif donné, elles vont néanmoins conduire souvent *ex ante* à un équilibre de Nash de surassolement.

La figure (7) illustre ces deux grandes familles de règles. Sur cette figure, les parallélogrammes blancs représentent les surfaces cultivables possédées.

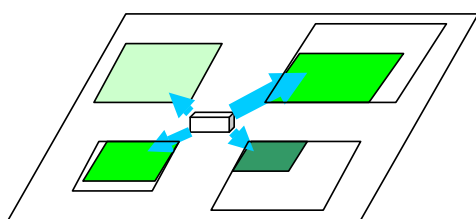
- Lorsque l'allocation est indépendante des choix des agriculteurs, ces derniers peuvent choisir de mettre en culture une faible surface, qui disposera alors d'un volume important à l'hectare (la surface cultivée est représentée sur la figure en vert foncé). Ils peuvent aussi choisir de mettre en culture une surface importante, de cultiver alors de façon plus extensive, mais ils n'obtiendront alors qu'un volume faible à l'hectare (en vert clair sur la figure).

- Lorsque l'allocation dépend des choix des agriculteurs : la figure (7) illustre deux

exemples. Un premier exemple correspond au cas où il existe un tour d'eau défini entre les agriculteurs. De plus, la règle stipule aussi que lorsque c'est le tour d'un agriculteur d'irriguer, il peut le faire autant de temps qu'il le souhaite. L'agriculteur va alors souvent, en pratique, satisfaire complètement les besoins de ses cultures : la seule caractéristique qui lui importera alors est la durée de retour du tour d'eau, qui dépend évidemment de ce que les autres agriculteurs ont mis en culture (schéma en bas à gauche de la figure). C'est la règle existante à El Melalsa, un des périmètres irrigués tunisiens étudiés.

Un autre exemple, beaucoup plus fréquent, est le cas où l'eau est allouée proportionnellement aux surfaces mises en culture, de façon à répartir au mieux *ex post* la pénurie, et ce quelles que soient les surfaces possédées. C'est aussi, de façon équivalente, le cas des règles établissant des ordres de priorité entre différentes cultures, par exemple entre le maraîchage et les céréales (schéma en bas à droite de la figure).

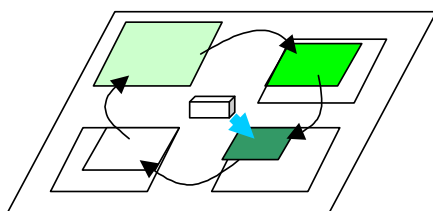
Pas d'interdépendance : règle *ex ante*



volume proportionnel
à la surface possédée

Interdépendance : règle *ex post*

tour d'eau avec durée
individuelle libre



volume proportionnel
à la surface mise en culture

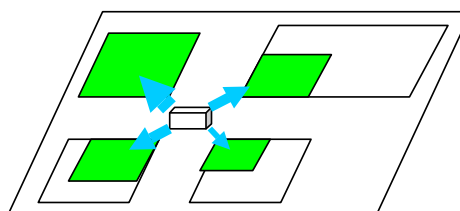


FIG. 7 – les éventuelles interdépendances créées par les règles d'allocation de l'eau

A priori, les règles autorisant des marges de manœuvre peuvent sembler être d'emblée inefficaces, tandis que les interdépendances ressemblent à des externalités qu'il faudrait internaliser. En fait, on observe de façon assez fréquente ces règles : la réponse n'est donc pas probablement aussi simple. Avant de chercher à comprendre pourquoi ces règles sont observées, la recherche de thèse va avant tout tenter de comprendre quelle peut être l'efficacité de ces règles, l'efficacité étant entendue comme la capacité à répondre à des objectifs globaux que la Collectivité se sera fixée par ailleurs. De la même façon, on peut établir une typologie des règles de taxation : au volume (linéaire, par palier), à la surface, au temps, etc. Montginoul (1997) et Johansson (2000) proposent une telle typologie.

0.4 Présentation des deux terrains d'étude

0.4.1 Des associations d'irrigants en Tunisie centrale

La Tunisie est, avec Israël, le pays du pourtour méditerranéen qui a le plus mobilisé ses ressources en eau potentielles : **les solutions mises en œuvre en terme de gestion conjointe de la ressource et des usages ont un intérêt à long terme pour toute la zone méditerranéenne.**

Actuellement, sur 4000 millions de m³ exploitables par an en eau superficielle et souterraine de façon renouvelable, 3100 millions sont déjà exploités. De plus, une fraction de 50 millions de m³ de ce volume exploité correspond à une surexploitation des nappes (Treger, 1999).

L'agriculture constitue le principal usage. "L'agriculture, qui constitue le principal secteur consommateur d'eau (à raison de plus de 80% des eaux mobilisées), représente un enjeu important (18% du PIB tunisien) et l'irrigation en particulier (35% de la valeur de la production agricole, 27% de l'emploi agricole)" (Feuillette, 2001).

En effet, si la tradition d'irrigation existe depuis l'époque romaine, après l'indépendance la Tunisie a investi massivement dans l'irrigation, à la fois pour assurer une autonomie alimentaire et pour limiter l'exode rural.

Des années 60 à la fin des années 80, l'irrigation est avant tout publique et gérée par des Offices de Mise en Valeur qui encadrent l'agriculteur depuis la vente des intrants jusqu'à la commercialisation des produits. En 1986, l'application d'un Plan d'Ajustement Structurel pour l'Agriculture aboutit à la disparition des Offices de Mise en Valeur et au processus de décentralisation progressif des périmètres publics irrigués (PPI) vers des associations d'irrigants.

Ces associations d'irrigants ont en fait un statut en Tunisie depuis la fin du XIX^{ème} siècle (Pérennès, 1993). Elles ont entre autres été mises en place dans le Sud Tunisien pour détruire et remplacer le système traditionnel oasien. Ces associations ont maintenant vocation à être mises en place sur tous les périmètres irrigués : les bailleurs de fonds conditionnent les subventions pour la réhabilitation à la décentralisation de la gestion à ces associations d'irrigants.

Ces Associations d'Intérêt Collectif (AIC) ont en charge la distribution et la vente de l'eau ainsi que la maintenance du forage et du réseau. Trois personnes y jouent un rôle important :

- o l'aiguadier établit le tour d'eau et manœuvre les vannes ;
- o le trésorier vend les bons correspondant à une durée d'irrigation ;
- o le président est responsable des arbitrages en cas de litige entre agriculteurs.

Un Comité d'Administration réunissant 3 à 9 membres existe souvent mais n'a en général que peu d'importance en pratique.

La gestion de l'eau se fonde en théorie sur deux principes.

D'une part, les AIC doivent suivre la règle officiellement en application dans les périmètres publics irrigués : **les agriculteurs ne doivent pas planter plus d'un tiers de leur surface l'été et plus de deux tiers l'hiver** (il existe une dérogation pour les agriculteurs possédant de petites surfaces, i.e. inférieures à un hectare).

D'autre part, pendant la campagne d'irrigation, les agriculteurs qui souhaitent irriguer vont acheter des bons auprès du trésorier. Ils vont ensuite présenter ces bons à l'aigua-

dier qui les inscrit sur une **liste d'attente**. En cas de tension sur la ressource, un **tour d'eau** est mis en place.

En pratique, les AIC sont extrêmement autonomes car la cellule GIC du CRDA n'a pas les moyens de faire des inspections plus de 2 à 3 fois par an. Ces AIC instituent leurs propres règles de gestion.

Certaines AIC, telles que Souaidia, appliquent la limitation sur les surfaces mises en culture, tandis que d'autres, telles que Bled Abida ou El Melalsa, ne l'appliquent pas. Des règles variées existent, concernant la possibilité d'irriguer des terres en proximité du périmètre, ou bien la possibilité pour un agriculteur d'irriguer alors qu'il possède un puits.

L'obligation d'acheter des bons auprès du trésorier avant de demander de l'eau à l'aiguadier est en général suivie, même si de façon ponctuelle l'AIC accepte d'accorder des crédits. En revanche, de nombreuses règles de priorité sont avancées d'un périmètre à l'autre..., voire au sein du même périmètre suivant les personnes concernées !

Fin 1997, il existe 616 AIC dont 474 opérationnelles, pour une superficie totale de 48000 ha, soit 28 % des 170000 ha de périmètres publics irrigués ou 13% des 360 000 ha irrigués dans le pays (Ranvoisy, 2001).

Enfin, selon la loi du 10 mai 1999, les AIC se nomment désormais Groupement d'Intérêt Collectif (GIC) et peuvent étendre leur rôle à certaines activités de coopérative à la demande de deux tiers des usagers.

Les usages agricoles et d'eau potable pour les villes et le tourisme devraient continuer de croître dans les années à venir. Devant la difficulté de créer de nouvelles ressources, l'Etat s'oriente de plus en plus vers une gestion de la demande, avec pour politique principale un programme d'aide à l'investissement en techniques économes en eau (aspersion et goutte-à-goutte). Si la décentralisation vers les GIC est initialement due à des problèmes budgétaires, l'Etat tunisien parie sur la réhabilitation des réseaux et sur une meilleure gestion de l'eau au sein des GIC pour maîtriser la croissance de l'usage d'eau agricole.

Le droit de l'eau

Historiquement, le droit de l'eau musulman autorise l'appropriation. "C'est au cours de la période des hafside (1236-1574) que le droit islamique des eaux s'est introduit dans le pays. Dans la *shariaâ*, l'eau est considérée comme un don de Dieu, par conséquent le principe fondamental est de favoriser le libre accès à l'utilisation de l'eau comme droit de communauté musulmane, et aucun musulman ne doit manquer d'eau. L'accaparement de l'eau par une seule personne ne doit en aucun cas produire la disette ou la ruine pour toute la communauté. En respectant cette condition, le musulman a le droit d'appropriation de l'eau et même de sa vente" (Ministère de l'Agriculture Tunisien, 1998). Dans les oasis du Sud tunisien, il existait ainsi des droits d'eau dissociés des droits sur la terre qui pouvaient être achetés et vendus. " Les droits d'irrigation sont bien, dans l'ensemble du Sahara, des droits privés et souvent tout à fait indépendants de la propriété de la terre ; ils peuvent être l'objet de toutes sortes de transactions, du simple prêt au nantissement avec intérêt. Il existait même à Wudja [une des oasis du Sud tunisien] une bourse des eaux à la criée, une vente aux enchères en quelque sorte, qui se tenait sur une des places, le soir au coucher du soleil et, à Gdama, un marché de l'eau le 1^{er} jour de mai" (Bédoucha, 1984). Depuis l'arrivée des Français à

la fin du XIX^{ème} siècle, l'autorité centrale a toujours cherché à transformer ces droits de propriété en droits d'usage d'une ressource appartenant à l'Etat.

Dans la région de Kairouan, l'eau des périmètres irrigués est considérée comme un bien collectif : un agriculteur qui perdrait son tour d'eau ne peut réclamer de compensation ; il ne peut pas non plus vendre son tour. De plus, lorsqu'un agriculteur met à disposition l'eau de son puits à un autre agriculteur, il n'y a jamais d'échange monétaire : le paiement sera une part fixe ou proportionnelle de la production.

Le projet MERGUSIE

La recherche s'est effectuée au sein du projet *Modélisation Intégrée des Usages et Ressources dans le bassin du Merguellil* (MERGUSIE). Ce projet a pour objectif d'établir une modélisation couplée du fonctionnement de la ressource (superficielle et souterraine) et des usages sur cette ressource. La zone d'étude est le bassin du Merguellil, un des trois oueds* qui débouchent sur la plaine de Kairouan (figure 8). Le projet MERGUSIE associe des instituts de recherche tunisiens, des directions générales du Ministère de l'Agriculture, le Commissariat Régional au Développement Agricole (CRDA) de Kairouan et l'IRD.

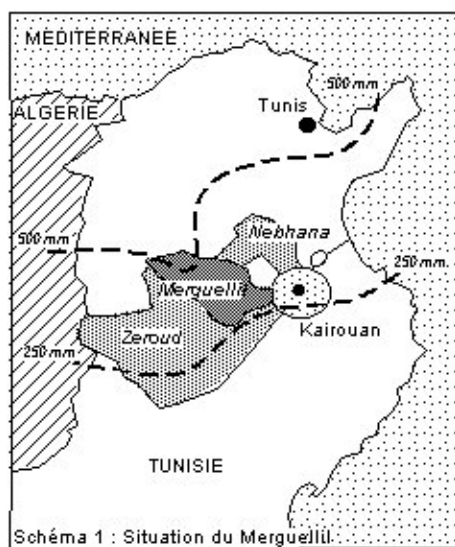


FIG. 8 – situation du bassin du Merguellil

En 1989, la construction du barrage d'El Haouareb sépare ce bassin en deux zones :

- la zone amont (1100 km²) comporte peu d'usages et un important dispositif de maîtrise de la ressource en eau et de l'érosion (tabias*, lacs collinaires) ;
- la zone aval (200 km²) sur la plaine, où l'irrigation et les forages d'eau potable ont provoqué un fort abaissement du niveau de la nappe (de l'ordre de 0.7 mètre par an depuis une vingtaine d'années). On compte environ 2000 exploitations sur cette zone.

Notre étude s'insère dans l'ensemble des recherches effectuées sur les usages. L'étude effectuée ici porte sur les associations d'irrigants, elle complète une étude sur les

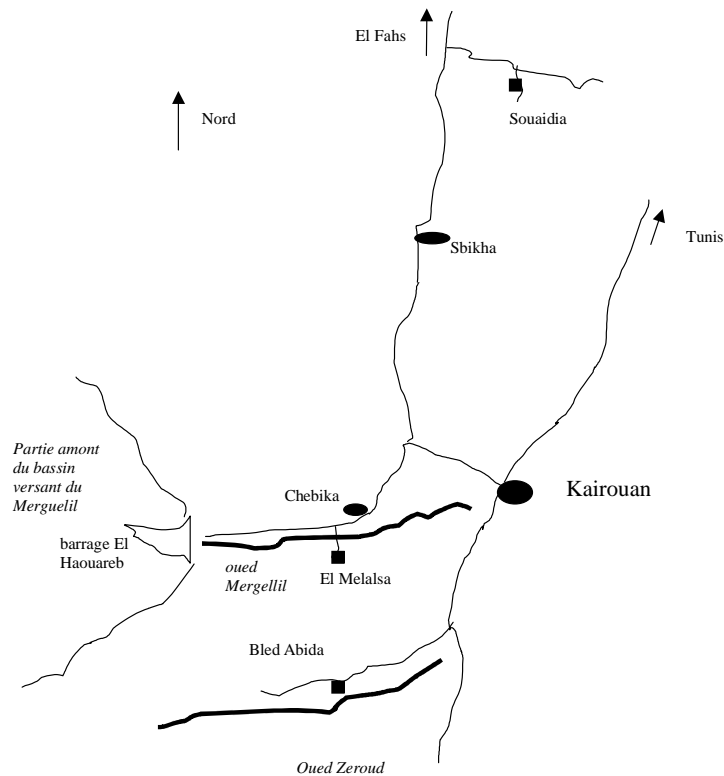


FIG. 9 – position des trois périmètres étudiés

périmètres publics irrigués (Keffi, 1998) et des études sur les puits privés : la dynamique de leur création (Feuillette, 2001) et les stratégies des irrigants face à une baisse de la nappe (Ben Hamouda, 1998).

Le travail effectué

En Tunisie comme ailleurs, de nombreuses études ont montré que, dans l'analyse de la distribution de l'eau, la part due au facteur "social", à savoir la règle d'allocation de l'eau, n'était pas du tout négligeable par rapport au facteur "technique", c'est-à-dire la qualité du réseau. L'étude va donc chercher ici à comparer l'efficacité de différentes règles d'allocation sur ces périmètres, à la fois les règles utilisées en pratique sur les périmètres étudiées, et d'autres règles envisageables.

Le travail a en fait été effectué en plusieurs étapes.

- Un court stage en mars-avril 1998 a permis de faire un bilan de l'ensemble des institutions de gestion de l'eau et de prendre conscience que la seule institution où existait une négociation sur l'attribution de l'eau était l'association d'irrigants.
- En mars-avril 1999, une revue de 12 associations d'irrigants dans le gouvernorat de Kairouan a permis d'avoir un aperçu des différents problèmes auxquels ces associations sont confrontées et d'en sélectionner trois pour une étude approfondie. Ces trois GIC ont été choisis pour les raisons suivantes.

- Ce sont des GIC anciens : il existe une expérience de la gestion collective de l'eau.

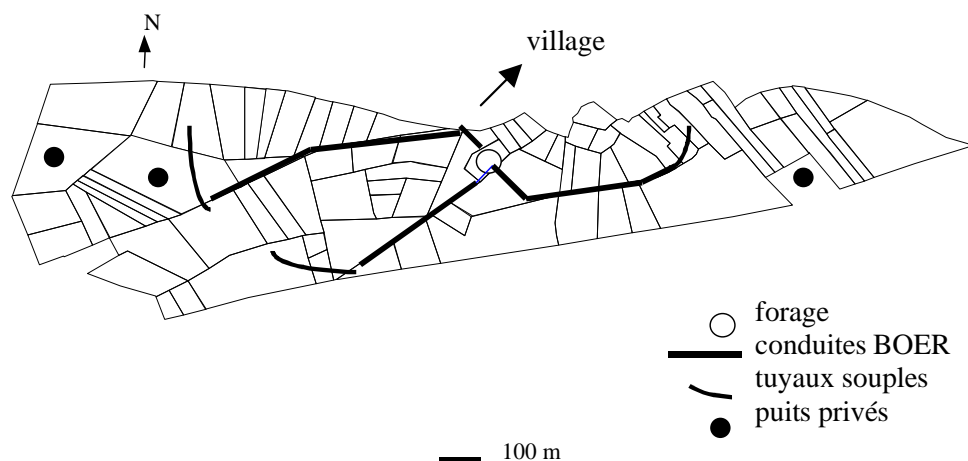


FIG. 10 – le réseau d'El Melalsa

- Ils représentent trois grands types présents dans la région : dans le gouvernorat de Kairouan, on compte pour moitié des GIC en réseau basse pression (la plupart en réseau enterré, quelques uns avec un réseau en tubes d'acier) et pour moitié en réseau gravitaire (Eureka/BTE 1999).
- Dans ces GIC, le facteur limitant est avant tout la disponibilité de l'eau, avant les problèmes de capacité d'investissement en début de campagne.
- o De février à juin 2000, une équipe d'étudiants se met en place pour réaliser un diagnostic complet de ces trois associations (voir annexe A page 234).
- o Des simulations de règles de gestion de l'eau ont été effectuées durant l'été 2000, ce qui a permis, en septembre 2000, un retour sur le terrain en Tunisie et des discussions avec les agriculteurs sur les résultats des modèles.

Brève présentation des trois associations d'irrigants étudiées

Cette section présente de façon sommaire les trois périmètres irrigués étudiés au printemps 2000 (fig. 9). Une présentation plus détaillée ainsi qu'un résumé du diagnostic effectué au printemps 2000 se trouvent en annexe A.

El Melalsa

Le périmètre irrigué d'El Melalsa est situé près de la ville de Chébika, à 20 km à l'Ouest de Kairouan. Le forage d'El Melalsa sert à la fois à l'irrigation d'un périmètre de 160 ha et à l'alimentation en eau potable du village. Ce village possède une forte identité : tous les habitants ont le même nom (les "Melassi") et vivent là depuis plusieurs générations. En 1992, le CRDA a approfondi le forage initial destiné à l'eau potable pour permettre l'irrigation : le forage descend désormais à 85 m et délivre un débit nominal de 30 l/s. L'eau est ensuite répartie entre trois lignes fournissant un débit de 10 l/s ; plusieurs fois par jour l'eau est basculée pour alimenter le bassin d'eau potable dans le village (figure 10).

Jusqu'au printemps 2000, le réseau est constitué de tuyaux en acier galvanisé prolongés par des tuyaux en PVC souples : l'irrigation, en gravitaire, peut donc se faire de façon

relativement efficace en déplaçant le tuyau dans le champ. Le problème majeur est l'existence de pertes, notamment dans la partie Ouest du réseau où les pertes peuvent s'élever à plus de 50%. D'autre part, la pression de la pompe est devenue insuffisante. Pendant l'été 2000, le réseau est remplacé par un réseau enterré sous haute pression permettant de faire du goutte-à-goutte et de l'aspersion directement grâce à la pression disponible à la borne.

Les agriculteurs ont découvert l'irrigation avec la construction du périmètre. Ils ont progressivement appris à cultiver du maraîchage, pour l'essentiel du melon et de la pastèque. Initialement, peu d'agriculteurs ont tenté de cultiver des cultures maraîchères. C'est pourquoi, durant les premières années, il n'y a pas eu de contrôle des surfaces mises en culture et chaque agriculteur pouvait irriguer autant qu'il le souhaitait lorsqu'il avait la main d'eau. Tous les agriculteurs ont adopté alors un assolement fondé sur la rotation suivante : du maraîchage suivi du piment couplé à la fève puis du blé.

Petit-à-petit, l'augmentation de la surface mise en culture ainsi que l'apparition de pertes sur le réseau ont conduit à un allongement du tour d'eau qui peut atteindre trois semaines au printemps, ce qui provoque une baisse de rendement considérable.

En 2000, la majorité des agriculteurs partagent le constat de l'inefficacité d'un manque de contrôle des surfaces mise en culture.

L'eau est payée à l'heure : les agriculteurs en bout de réseau reçoivent moins d'eau pour le même prix que les agriculteurs proches du forage ; de plus la durée payée comprend le temps de remplissage des tuyaux.

La répartition de l'eau est souvent conflictuelle et inéquitable : les agriculteurs proches du réseau obtiennent l'eau plus souvent. Le président du GIC exhorte les agriculteurs à ne pas planter plus de 1 ha de melon... tandis que lui-même en plante 2. Signe de ce mauvais fonctionnement collectif : le président, l'aiguadier et le trésorier ont tous les trois créé leur puits soit à l'intérieur soit à l'extérieur du périmètre pendant l'hiver 1999-2000.

Le passage à un réseau sous pression ainsi que le changement de président, en septembre 2000, devraient permettre d'instaurer de meilleures règles de gestion. Un remembrement devrait aussi être effectué suite à la rénovation du réseau.

Bled Abida

Le périmètre de Bled Abida est situé à 30 km au Sud-Ouest de Kairouan, à côté du village de Kilani et en bordure de l'oued Zeroud. Il fait partie de l'ensemble des périmètres construits dans les années 60. Le périmètre, de 125 ha, fonctionne depuis 1969. Une pompe fournissant un débit initial de 40 l/s alimente un réseau constitué de séguis* en béton. Le réseau divise le périmètre en quatre zones, chacune irriguée par une main d'eau de 10 l/s. L'infrastructure est très endommagée : des parties entières du réseau ne fonctionnent plus (réseau en tiret sur la figure 11). De plus, des pannes de la pompe ont eu lieu fréquemment ces dernières années. Les cultures sont traditionnellement l'olivier, les céréales et le fourrage. Depuis la construction du réseau, les agriculteurs ont progressivement semé aussi du maraîchage (corette*, pastèque, melon). Cependant, le mauvais état du réseau et les fréquentes pannes ont conduit les agriculteurs à s'orienter vers l'élevage et les cultures fourragères en attendant la rénovation promise depuis longtemps. D'autres agriculteurs sont partis trouver du travail en ville ou bien ont investi dans un puits, soit dans le périmètre soit à l'extérieur.

Le tour d'eau est réalisé au jour le jour par l'aiguadier en fonction des demandes et

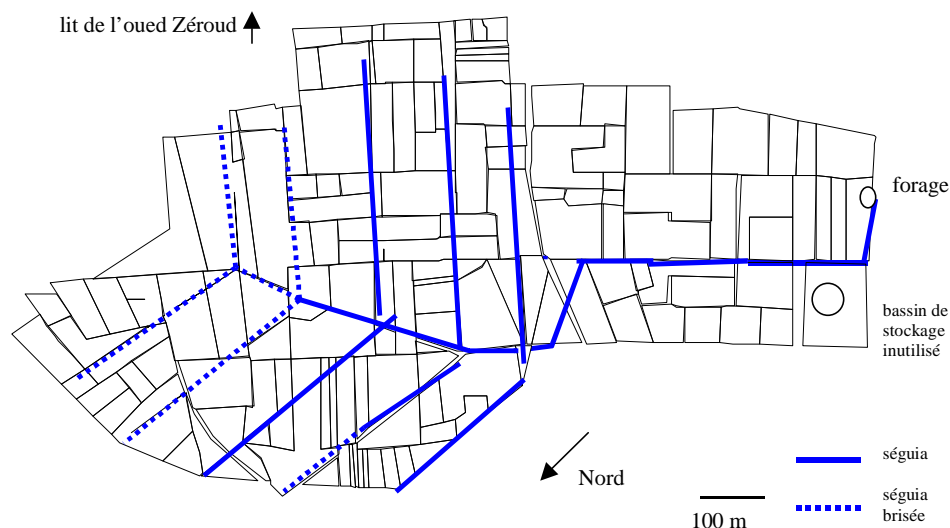


FIG. 11 – le réseau de Bled Abida

des contraintes du réseau. Les pertes du réseau et les pannes sont considérées comme beaucoup plus limitantes que la durée du tour d'eau.

Comme à El Melalsa, le paiement de l'eau se fait en tenant compte de la durée d'irrigation, quel que soit le débit réellement distribué.

Fin 2000, le réseau devait être rénové mais, au titre de la gestion participative, il est demandé 100 Dinars (DT) par hectare et par agriculteur (50 avant la rénovation puis 50 de plus après). Quelques agriculteurs qui ont créé leur puits ou trouvé du travail ailleurs refusent de payer cette somme et bloquent la procédure de rénovation.

Un projet de remembrement a été réalisé dans les années 80 mais il n'a pas abouti et devrait être, comme pour El Melalsa, relancé à l'occasion de la rénovation du réseau.

Souaidia

Le périmètre de Souaidia est situé à 60 km au Nord de Kairouan. Le réseau a commencé à fonctionner en 1994 et l'ensemble a tout de suite été géré par une AIC. Le réseau irrigue un périmètre de 120 ha divisé en quatre secteurs, avec un débit initial de 40 l/s à partir d'un forage profond de 180 m (figure 12). Un bassin régulateur de 50 m³ permet qu'un agriculteur puisse irriguer seul. Le réseau est enterré et sous basse pression. L'irrigation était jusqu'en 2000 en gravitaire. En 2000, les agriculteurs ont pour la majorité choisi de se construire un petit bassin individuel de 50 à 100 m³ avec une pompe de reprise pour pouvoir faire de l'irrigation sous pression.

L'assolement est fondé pour l'essentiel sur l'alternance piment-blé. Progressivement, les agriculteurs apprennent à diversifier les cultures de maraîchage. En raison de la profondeur de la nappe, il n'y a pas de puits à l'intérieur du réseau. Le remembrement a eu lieu en 1999.

Sur chaque borne, un compteur en volume permet de mesurer la consommation d'un agriculteur à chacune de ses irrigations.

De manière générale, ce GIC fonctionne bien, à la fois en ce qui concerne les aspects techniques et pour la gestion collective de l'eau.

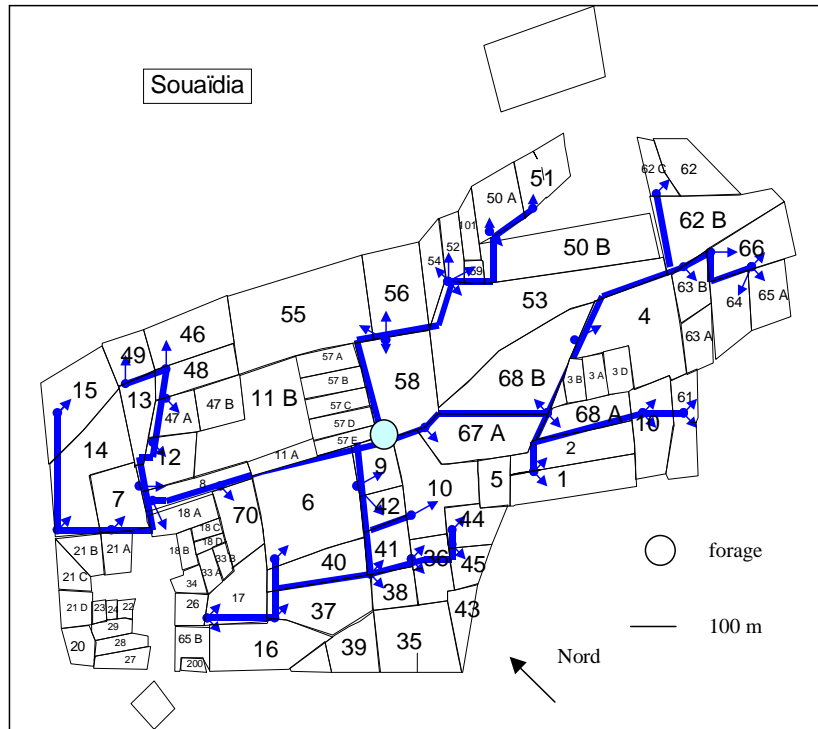


FIG. 12 – le réseau de Souaïdia

0.4.2 Le bassin de l'Adour en France

Le bassin de l'Adour, dans le Sud-Ouest de la France, est une des grandes régions de l'irrigation en France avec 138000 ha pour une superficie de 16 800 km² ⁶(figures 13 et 14). La demande en eau a augmenté massivement depuis 20 ans, et ce principalement parce que les exploitations agricoles se sont tournées vers une quasi-monoculture de maïs irrigué. Parallèlement, les associations de protection de la nature et les collectivités locales ont commencé à revendiquer un nécessaire débit minimum d'étiage.

Depuis une quinzaine d'années, cette croissance de l'irrigation a causé quelques crises sévères au mois d'août, par exemple en 1990 et 1995 (Faÿsse, 1998). La gestion initiale de la sécheresse est une gestion réglementaire au niveau départemental fondée sur un couple Autorisation de prélèvement - Décret Sécheresse. L'autorisation de prélèvement accorde un quota en débit pour un prélèvement en rivière et doit être renouvelée chaque année. Pendant la période d'étiage, lorsque le débit de la rivière descend en dessous du Débit Objectif d'Etiage (DOE), des interdictions de prélèvement sont décrétées par le Préfet. Elles limitent le nombre de jours de la semaine pendant lesquels les agriculteurs peuvent irriguer. Cette gestion s'est avérée peu efficace et mal acceptée pour trois raisons.

- a) *L'absence de coordination entre départements.* En 1995, sur une partie de l'Adour moyen, les niveaux d'interdictions n'étaient pas les mêmes sur la rive gauche, appartenant aux Hautes-Pyrénées et sur la rive droite, appartenant au Gers.
- b) *La lenteur de la mise en place des restrictions de prélèvement une fois le niveau*

⁶Pour une description précise des usages, on pourra se reporter au cahier réalisé par l'Agence de l'Eau Adour-Garonne (1996) et pour les institutions à (Faÿsse, 1998).

seuil atteint.

c) *Les choix stratégiques des agriculteurs pour limiter l'impact des interdictions.* D'une part, dans certains cas le manque de contrôle des débits équipés a permis aux agriculteurs de se suréquiper en matériel de pompage. D'autre part, les agriculteurs anticipent parfois la mise en place d'une restriction et alors décident d'irriguer plus...ce qui ne fait qu'accentuer la baisse du débit de la rivière.

Pour faire face à cette pénurie, deux types d'approches ont été mises en œuvre.

- o D'abord, sur un certain nombre d'affluents de l'Adour, des retenues en tête de bassins versants ont été construites. Ces retenues sont gérées par les Sociétés d'Aménagement Régional (SAR) : la Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne (CACG) pour la partie Midi-Pyrénées et la Compagnie d'Aménagement Rural d'Aquitaine (CARA) pour la partie Aquitaine ⁷. Sur ces affluents (l'Arros, le Louet...), le volume du barrage est réparti en une partie pour l'irrigation et l'autre pour assurer un débit seuil de gestion à la confluence avec l'Adour. Une surface totale irrigable est alors définie et répartie entre les irrigants. Ceux-ci signent un contrat avec le Gestionnaire, qui leur garantit 9 années sur 10 un quota en débit ou en volume. Cette gestion, appelée **gestion maîtrisée**, est reconnue par l'ensemble des usagers comme efficace (...si l'on accepte le principe de quasi mono-culture de maïs).

- o Ensuite, une gestion de la pénurie à l'échelle du bassin versant s'est progressivement mise en place. Cette intégration était d'autant plus nécessaire que, dans cette région, le réseau hydrographique et le maillage administratif sont étroitement imbriqués (fig. 14). Cette gestion de la pénurie a été contractualisée en 1999 sous la forme d'un Plan de Gestion des Etiages (PGE). Ce plan indique, pour tous les affluents et pour les différentes parties de l'Adour, le volume disponible pour l'irrigation, la surface irrigable et les différents débits seuils en cas d'étiage. Il indique aussi quels sont les projets de retenues et comment les volumes, les surfaces et les débits précédents pourront être modifiés suite à la construction de ces retenues. Enfin, ce PGE coordonne les dispositifs d'alerte et d'interdiction de prélèvement, ce qui permet de répondre aux points a) et b) présentés précédemment quant à l'inefficacité de la gestion réglementaire.

Si l'ensemble de ces mécanismes de gestion est globalement satisfaisant, il reste néanmoins des parties du bassin versant où il n'y a pas de retenues en tête. C'est le cas du Gabas, dans les Pyrénées Atlantiques et dans les Landes ; cependant un barrage de 20 millions de m³ devrait être construit dans les 5 ans à venir. En revanche, pour l'Adour moyen, il n'est pas prévu de retenue pour l'instant.

Sur le Gabas et l'Adour moyen, il ne peut y avoir pour l'instant de gestion maîtrisée. La question est donc ouverte de savoir comment, compte-tenu de l'absence de contrôle en amont du débit dans la rivière, on peut mettre en place une gestion collective efficace : il faudra pour cela réussir à réduire l'inefficacité due aux comportements stratégiques des agriculteurs, tels que présentés dans le point c) précédent. Cette question est d'autant plus d'actualité que l'année 2002 devrait voir l'achèvement de la mise en place des compteurs individuels.

⁷La CARA est depuis l'année 2000 intégrée à la CACG.

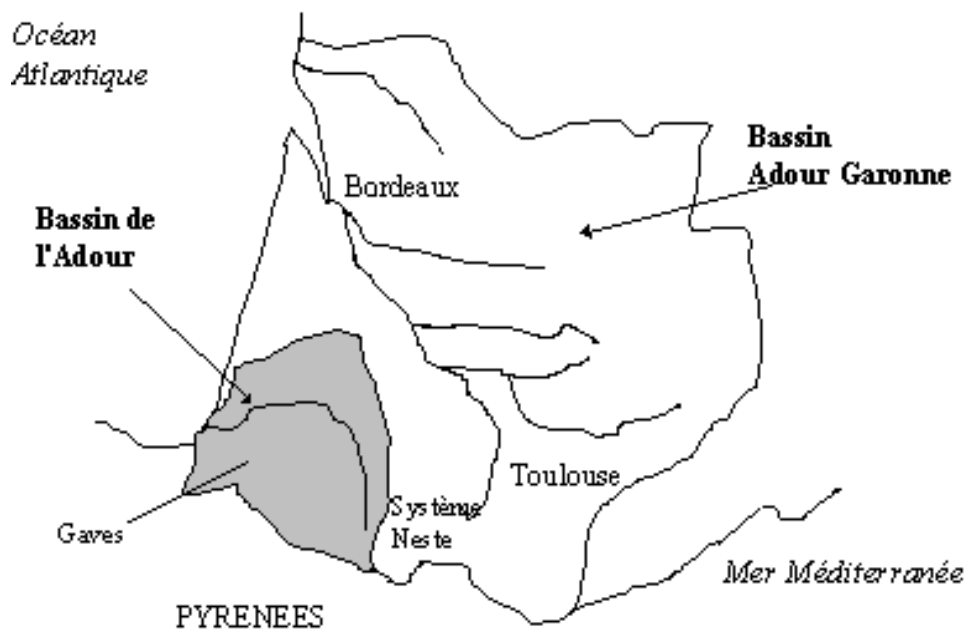


FIG. 13 – le bassin de l'Adour

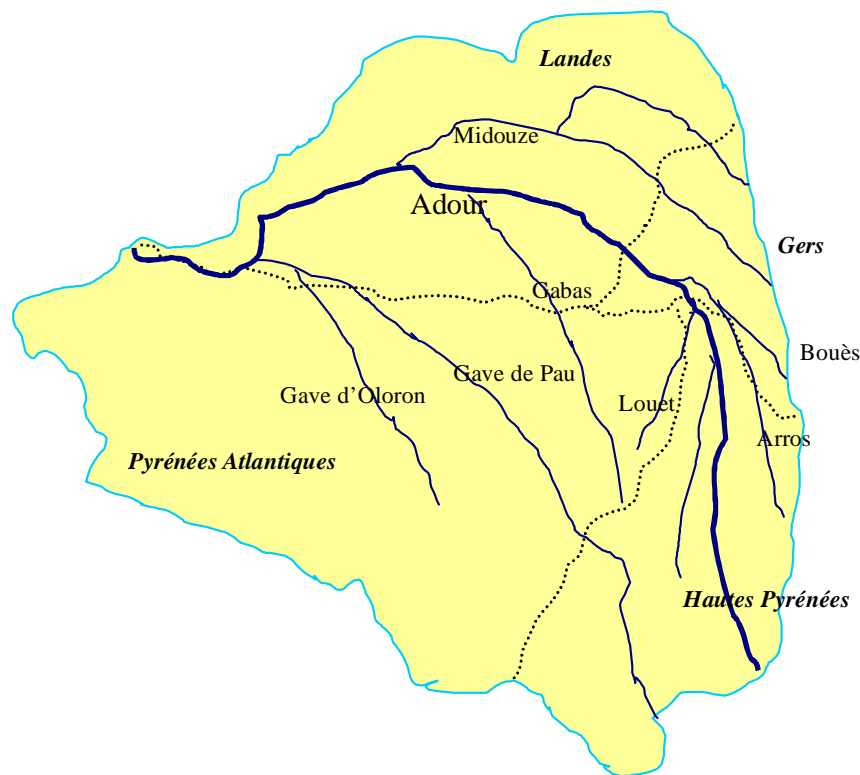


FIG. 14 – départements et rivières principales du bassin de l'Adour

Ces deux sous-régions seront étudiées, et de façon plus précise :

- la partie du bassin versant du Gabas située dans les Pyrénées Atlantiques (i.e. l'amont du bassin) ;
- l'Adour gersois, situé entre les communes d'Aire sur Adour et d'Estirac.⁸

⁸Le travail suivant a été effectué.

- L'étude du bassin a commencé avec un stage de fin de DEA qui a permis de faire une synthèse de la gestion de l'eau sur l'ensemble du bassin versant (Faÿsse, 1998). Lors de ce stage, des élus locaux, des responsables associatifs, des personnes des DDAF, DIREN, Agence de l'Eau, Institution Adour, CACG ont été rencontrés.

- Durant l'été 1999, l'enquête s'est focalisée sur les irrigants de l'Adour gersois et du Gabas.

- De septembre 2000 à janvier 2001, Sophie Chevallier, en stage d'année césure de l'INA-PG, a fait une analyse des interactions stratégiques pour la gestion de l'eau, sur les bassins de l'Adour Gersois et du Gabas.

Chapitre 1

Question initiale de la thèse et voisinages théoriques

*La ligne la plus courte passant par deux points n'est jamais la ligne droite.
Sauf si, bien sûr, ils se trouvent bien l'un en face de l'autre.*

Pierre Desproges

Résumé du chapitre

La littérature sur l'analyse économique des Ressources en Bien Commun a permis de démontrer l'efficacité d'une gestion collective dans certains cas, face aux alternatives d'une nationalisation ou de la définition de droits individuels transférables. Cependant, cette littérature s'est avant tout intéressée à expliquer la possibilité de coopération avec des jeux non coopératifs à règle donnée, sans prendre en compte la capacité des agents à créer leurs propres règles de gestion.

Par rapport à cette littérature, l'approche choisie reste dans le cadre non coopératif de l'application d'une règle donnée. Son originalité consiste à comparer des règles d'allocation et de taxation de natures très différentes, de prendre systématiquement en compte une marge de manœuvre laissée aux agriculteurs et de travailler avec un nombre quelconque d'agriculteurs.

La question de thèse correspond à la recherche de fonctions d'allocation et de taxation permettant de maximiser la fonction de bien-être de la Collectivité sous les contraintes de disponibilité d'eau, d'équilibre budgétaire et d'un équilibre de Nash entre les choix des agriculteurs.

Ce chapitre présente la problématique générale de la thèse : la question initiale, son contexte théorique et la formalisation mathématique qui peut en constituer une lecture. La première section pose la question initiale de la recherche effectuée de façon qualitative. Cette question s'insère dans le champ de littérature sur l'analyse économique des ressources en bien commun. Un état de l'art permet de proposer une synthèse des principaux résultats et des perspectives de recherche, puis d'y situer la problématique de thèse (section 2). Deux brèves sections suivantes présentent les liens possibles avec les analyses économiques des instruments de gestion de l'eau et la théorie des choix publics. Ensuite, un plan de travail est dressé : il donne la structure générale d'analyse des 3 chapitres suivants. Enfin, la dernière section présente la formulation mathématique générale de la question de thèse qui constituera une structure commune aux deux chapitres suivants.

1.1 La question initiale

La question initiale de la thèse est la suivante.

Pour atteindre les objectifs fixés (valorisation de l'eau, équité, parfois partage du risque) , le Gestionnaire fait très souvent face à des coûts d'acquisition de l'information :

- *sur les caractéristiques individuelles des agriculteurs ;*
- *sur leurs comportements.*

Par ailleurs, il existe un ensemble de règles d'allocation et de taxation de l'eau qui se caractérisent par :

- *un niveau d'agrégation de l'information acquise par le Gestionnaire sur les comportements et les caractéristiques individuelles ;*
- *l'existence de marge de manœuvre laissée aux irrigants ;*
- *l'existence ou non d'une interdépendance entre les agriculteurs.*

Quelle capacité des différentes règles d'allocation à atteindre des objectifs définis ?

- *Lorsque le coût d'acquisition de l'information sur les caractéristiques individuelles est prohibitif, le Gestionnaire n'a aucune information pour imposer les choix individuels. On étudie alors le cas où il laisse alors une marge de manœuvre aux irrigants : quel peut être alors le bon degré d'interdépendance créée par la règle d'allocation ?*
- *De plus, lorsque le coût de contrôle des comportements individuels est important, investir dans l'acquisition de l'information permet de diminuer la marge de manœuvre des agriculteurs et donc de limiter les impacts négatifs dus aux interdépendances qu'engendre toute allocation collective. Quel niveau d'acquisition de l'information est-il alors intéressant d'atteindre ?*

Pour traiter cette question, trois hypothèses sont faites.

- *Les agriculteurs maximisent leur revenu ou bien, en univers incertain, l'espérance d'utilité de leur revenu.*

Cette hypothèse ne peut évidemment pas être faite de façon générale, mais les études de terrain en Tunisie comme sur l'Adour ont montré que dans les deux cas, la maximisation du profit était un critère de décision déterminant pour les agriculteurs.

- *Lorsqu'il y a interdépendance, les choix des agriculteurs se font de façon simultanée.*

Cette hypothèse peut se justifier par le fait que les systèmes étudiés sont composés d'un nombre assez important d'acteurs : de 30 à plus de 200.

- *L'équilibre de Nash fournit une bonne description des choix des agriculteurs lorsqu'une règle engendre des interdépendances.*

De nombreuses études sur les ressources en bien commun ont montré que, dans certains cas, l'équilibre de Nash donnait une bonne description des interactions observées (voir section suivante).

1.2 Position par rapport à l'analyse des ressources en bien commun

Nous avons posé la question initiale sur la gestion de l'eau. En fait, tout un courant de littérature économique tend à montrer que les problèmes et les solutions dans ce cas sont semblables pour toutes les ressources en bien commun (Ostrom, 1992) et même pour tout problème d'action collective.

Cette partie propose une revue de littérature sur l'analyse économique des ressources en Bien Commun : c'est avant tout un essai de structuration d'une littérature foisonnante. Quelques articles qui m'ont semblé à la fois novateurs et prometteurs pour d'autres recherches sont présentés plus en détail.

La première sous-section propose une définition des Ressources en Bien Commun (RBC) ainsi que l'approche générale qui a été choisie par la plupart des économistes pour analyser ce domaine. La sous-section suivante présente plus en détail les différents problèmes existants dans le cadre d'une RBC, et notamment ce qui les différencie de ceux des biens publics. Ensuite, une description structurée des différents modèles de jeux non coopératifs utilisés est proposée : ils permettent de rendre compte de la possibilité d'une coopération pour une règle de gestion donnée. La sous-section suivante fait le point de la (faible) analyse des négociations au sein des RBC. Un bilan du lien entre théorie et observations de terrain permet de dessiner les principales perspectives de recherche et de situer la recherche de thèse par rapport à ces perspectives.

1.2.1 Qu'est-ce qu'une ressource en bien commun ?

De façon générale, on ne définit souvent que deux types de biens :

- **les biens privés** qui vérifient le principe de rivalité : le bien consommé par un agent ne peut l'être par un autre ;

◦ **les biens publics**, qui ne vérifient pas ce principe : “l’usage par un agent n’empêche pas l’usage par d’autres agents ; il n’y a pas de destruction par l’usage” (Laffont, 1985). Pour ces biens publics, on introduit souvent ensuite une séparation entre ceux dont l’exclusion est possible (club de sport) et ceux pour lesquels c’est impossible (Défense Nationale) (Picard, 1994).

Ostrom et al. (1994) et Griffon (2001) proposent d’effectuer cette distinction aussi pour les biens privés. Une ressource en bien commun (RBC) est alors un ensemble de biens privés (poissons, arbres...) pour lesquels il est à la fois difficile (mais pas impossible) d’exclure l’usage et pour lesquels le coût de définition de droits individuels est prohibitif. Dans cette acception, une RBC contient potentiellement le cas de l’accès libre, ce qui peut conduire à des confusions.

Par la suite, une **Ressource en Bien Commun sera donc définie comme un ensemble de biens privés pour lesquels :**

- **l’accès à la ressource est limité** (ce qui va de la simple définition des personnes autorisées à en profiter à la définition complète de ce dont chaque personne peut disposer) ; il n’y a pas d’accès libre ;
- **il est difficile de mettre en œuvre un droit de propriété individuel** ; ce point distingue la RBC d’un bien privé.

La figure (1.1) présente les différents types de bien possibles. Les RBC peuvent se distinguer selon le niveau de contrôle de l’usage, depuis la situation la moins régulée jusqu’à celle où l’allocation de chaque agent est complètement précisée : ces derniers ne disposent alors plus de marge de manœuvre *ex post*.

Un exemple simple de RBC est celui de la pêche : même si le poisson en lui-même est un bien privé, les bancs de poissons sont mobiles, de taille peu connue, ce qui rend impossible une répartition en droits individuels. On pourra donc considérer qu’une zone de pêche dont l’accès est contrôlé est une RBC.

Sur la figure (1.1) sont aussi définis les biens clubs, qui ne suscitent pas de rivalité dans l’usage mais dont l’accès est aisément contrôlé. C’est le cas par exemple d’un club de sport ou de la carte “universelle” permettant l’accès illimité dans certains réseaux de salles de cinéma.

	pas de restriction d’accès	accès limité à la ressource	
		droits de propriété difficilement mis en oeuvre	droits de propriété facilement mis en oeuvre
rivalité dans l’usage	bien privé en accès libre	utilisation de la RBC peu régulée <div style="display: inline-block; vertical-align: middle; text-align: center;"> → </div> utilisation de la RBC complètement régulée	bien privé
non rivalité	bien public	bien club	

FIG. 1.1 – typologie des biens

Le problème de l’action collective

Le problème fondamental d’une RBC, appelé aussi problème du “1/n”, ou encore problème du passager “passager clandestin” est le suivant : dans un groupe de n agents,

chaque agent ne subit par le biais du bien collectif qu'un n -ième du coût (resp. du profit) marginal de son effort, alors qu'il mesure directement le profit (resp. le coût) total de cet effort. Ce problème se divise en deux applications majeures : la sous-fourniture pour la production du bien et le sur-investissement pour l'appropriation de la ressource. En fait, par définition, les droits de propriété sont difficilement mis en œuvre dans une RBC, ce qui conduit à des usages qui créent des externalités* entre les différents agents. **Le problème de l'“action collective” est donc un problème classique de mauvaise prise en compte d'externalités dans le cas particulier d'une ressource en bien commun telle que définie ci-dessus.**

Deux exemples pour illustrer ce problème : d'abord le célèbre pâturage en commun décrit par Hardin (1968), où l'optimum collectif consisterait à ce qu'il n'y ait, par exemple, que 100 moutons sur le pré. Cependant, à la situation optimale donnée, chaque berger voit l'intérêt immédiat d'ajouter un mouton mais ne perçoit qu'indirectement et partiellement la baisse de la productivité par mouton qu'une augmentation de la taille du troupeau collectif provoquerait. Sans règles de contrôle, les choix des bergers aboutissent à une situation d'équilibre, par exemple une charge totale de 150 moutons, qui n'est pas efficace d'un point de vue collectif. De la même façon, lorsqu'un réseau d'irrigation est en mauvais état, chaque irrigant voit le coût total de son action pour l'entretien mais ne perçoit que partiellement les gains que son action procure.

Un mauvais paradigme initial d'analyse...

L'article de Hardin (1968), **The tragedy of the commons**, explique qu'à cause du problème du “ $1/n$ ”, toute ressource en bien commun est vouée à la surexploitation. L'idée est implicitement celle du dilemme du Prisonnier. Hardin utilise le terme de “tragédie” dans le sens d'action inéluctable, qui s'impose au joueur..., évidemment, le terme a eu du succès pour tout ce qu'il pouvait exprimer par ailleurs. Hardin pense que les seules solutions pour éviter la Tragédie des Communs sont la nationalisation ou la définition de droits individuels transférables.

En fait, dans cet article, Hardin estime que toute ressource en bien commun est par nature une ressource en accès libre. C'est contre cette assimilation simpliste que, depuis une quinzaine d'années, la plupart des articles sur le sujet se positionnent.

Cependant, l'essentiel de ces articles restent dans le même paradigme initial, c'est-à-dire que les agents agissent chacun “dans leur coin”, sans possibilité de mise en œuvre de règles de gestion collective de façon ascendante.

Les économistes ont cherché à expliquer le fait que la Tragédie des Communs pouvait ne pas avoir lieu en pratique :

- soit en montrant que des situations pouvaient se modéliser par d'autres modèles non coopératifs que celui du dilemme du prisonnier ;
- soit en gardant la structure initiale du dilemme du prisonnier mais en l'insérant dans une structure plus large (existence de morale, jeu répété un nombre inconnu de fois, etc.).

Ce faisant, ces études ne prennent pas en compte la capacité de créer des règles. Dans le cas du dilemme du prisonnier, elles cherchent en fait les paramètres du jeu qui permettent de faire en sorte que les joueurs internalisent plus les externalités (c.f. discussion sur l'impact de l'hétérogénéité infra).

La recherche en économie sur les RBC a donc, pour l'essentiel, permis de

proposer différentes approches pour estimer le niveau de prise en compte des externalités pour une règle donnée.

Si on reprend la figure des différentes étapes de mise en œuvre de gestion de l'eau (fig. 1), la recherche a porté sur l'impact d'une règle donnée, au niveau de l'application des règles, en s'intéressant très peu au niveau supérieur, celui du choix des règles de gestion.

Une ligne de démarcation "historique" entre théorie des jeux non coopératifs et coopératifs a été proposée par Harsanyi en 1966 : dans les jeux coopératifs, tout engagement est irrévocable. Bien que cette définition de la ligne de démarcation reste problématique (Schmidt, 2001), elle permet d'éclairer le paradigme qui sous-tend une grande partie de l'analyse des RBC : on considère que (i) les agents ne peuvent faire de propositions les engageant irrévocablement et (ii) ne peuvent mettre en place les conditions permettant de rendre leurs engagements irrévocables.

L'analyse des RBC telle qu'elle a été en général menée s'appuie donc sur une approche a priori extrêmement limitante, qui, dès le départ, ne pourra rendre compte de la réussite ou de l'échec de la gestion suite à l'apparition d'un problème d'action collective dans le cadre d'une RBC.

...mais des résultats néanmoins utilisables !

La théorie économique sur les RBC ne peut donc pas se passer d'une théorie de la négociation qui propose une grille de lecture des choix possibles de règles de gestion de la RBC par les usagers eux-mêmes.

En théorie des jeux, la négociation peut être analysée selon deux approches (Fleurbaey, 1996).

- Le **théorie du marchandage** dérive, à partir d'axiomes généraux, un opérateur mathématique qui va choisir une solution parmi l'ensemble des optimums de Pareto. C'est une théorie de jeux non coopératifs qui permet de comprendre comment les joueurs décident, de façon individuelle, de participer ou non à la négociation. On ne s'intéresse pas alors aux coalitions.

- La **théorie des jeux coopératifs** s'intéresse, elle, à l'allocation des revenus issus d'une action coopérative : elle va prendre en compte la possibilité de l'existence de coalitions, par exemple en cherchant des allocations globales qui soient robustes à toute coalition potentiellement déviante (*le cœur*) ou alors en construisant une allocation en fonction du poids de chaque acteur dans l'ensemble des coalitions possibles (*la valeur de Shapley**).

Ces théories permettent de comprendre comment les joueurs se situent dans la discussion par rapport à ce qu'ils estiment avoir à gagner ou à perdre de telle ou telle règle.

Est-il immédiat de calculer l'impact d'une règle de gestion de RBC sur les gains d'un type d'agents ? En pratique, non, car dans quasiment tous les cas, une règle laisse une marge de manœuvre aux agents : il est très difficile de mettre en œuvre des RBC complètement régulées.

L'éventail des scénarios possibles porte donc sur des règles qui contrôlent plus ou moins les marges de manœuvres des joueurs : pour déterminer l'issue d'une règle, il faudra donc prendre en compte ces marges de manœuvre, qui sont modélisables par un jeu non coopératif..., et nous voilà retournés au paradigme précédent. De plus, tout

jeu coopératif est fondé sur un jeu non coopératif : celui d'accepter d'entrer dans la négociation et la recherche de coalitions.

Par conséquent l'approche précédente, si elle est fondamentalement insuffisante, fournit néanmoins une base nécessaire à l'élaboration d'une théorie de la négociation pour les RBC.

Pourquoi la théorie des jeux ?

Si le problème des Ressources en Bien Commun est avant tout un problème d'externalité, pourquoi ne pas mobiliser d'abord les outils d'économie de l'environnement tels que la taxe pigouvienne ?

Une réponse très générale : dans de nombreuses situations de RBC, si les agents sont prêts à payer pour contribuer à la production de la ressource (par exemple les coûts d'énergie d'un périmètre irrigué), ils n'accepteraient pas l'utilisation d'une taxe incitative, quelle que soit la répartition faite des produits de la taxe. Cette attitude peut provenir du refus d'un prix comme signal de la rareté ; mais elle peut aussi provenir du fait que le système de perception puis de redistribution est opaque aux yeux des usagers de la ressource et que ces derniers ne veulent pas courir le risque d'un détournement des fonds récoltés.

Une autre raison peut être aussi avancée : dans le contexte des RBC, puisqu'il est difficile de définir des droits de propriété par définition, il est très coûteux de calculer de façon exacte le dommage ou le bénéfice marginal de l'action d'un agent sur la Collectivité.

1.2.2 Quelles spécificités des problèmes d'externalité des RBC par rapport à ceux des biens publics ?

Deux problèmes d'externalités

Le problème de non prise en compte des externalités existe à deux niveaux dans le cadre d'une RBC.

a) La fourniture du bien commun

Les agents doivent investir pour créer ou entretenir la ressource qui sera collectivement disponible ou les moyens de la rendre disponible (réseau d'irrigation par exemple). Il y a un problème de passager clandestin de sous-contribution.

Le problème de non prise en compte par les agents de l'externalité positive de contribution n'est pas spécifique aux RBC, puisqu'il touche aussi tous les biens publics. Dans un des articles fondateurs de la théorie de l'aléa moral en équipe, Holmstrom (1982) étudie la fourniture d'un bien public par un groupe d'agents. Il montre qu'il n'existe pas de règle de partage qui puisse à la fois constituer un équilibre de Nash sur les choix des agents et atteindre l'optimum de Pareto. Il montre aussi qu'avec des pénalités collectives on peut s'approcher de façon arbitrairement proche de l'optimum..., mais ces pénalités collectives sont évidemment politiquement inapplicables !

b) L'appropriation

Les agents doivent choisir une règle de répartition de cette ressource. Suivant les cas, ils peuvent choisir ou non un niveau d'investissement pour pouvoir valoriser la ressource. La différence entre ce problème et celui de la congestion d'un bien public réside dans le fait qu'ici les agents doivent effectuer un *effort*, ou investissement, pour utiliser la ressource : l'inefficacité réside alors dans le risque de sur-effort pour l'appropriation du bien, sur-effort qui se traduira par un mauvais retour sur investissement.

De façon plus formelle, le problème du "1/n" est qu'avec une technologie à rendements décroissants, l'équilibre de Nash n'est jamais Pareto efficace (Roemer, cité par Funaki et Yamato, 1999).

Un modèle générique de biens public et commun

Les résultats théoriques qui lient structure du jeu et importance des externalités pour un bien commun ou un bien public sont proches. Bardhan et al. (2000) proposent un cadre général qui permet de représenter à la fois les biens publics et les biens communs, selon la valeur des paramètres du modèle. Pour estimer l'impact de l'inégalité entre agents sur l'action collective, ils construisent un modèle générique qu'il nous paraît intéressant de présenter ici.

Chaque agent possède une richesse initiale qu'il peut investir soit dans un bien privé k_i , soit dans une contribution x_i à la production d'un bien collectif. En fonction de son effort x_i et de l'effort total effectué par tous les agents $X = \sum_j x_j$, l'agent peut profiter du bien collectif produit à hauteur de :

$$Z_i = \left(\frac{x_i}{X}\right)^\theta X^\gamma \quad (1.1)$$

avec $0 \leq \theta \leq 1$ et $0 \leq \gamma \leq 1$. Le terme $(\frac{x_i}{X})^\theta$ de l'équation (1.1) représente ainsi un terme de congestion dans la consommation, i.e. une externalité négative indexée par θ . L'autre terme, X^γ , représente l'externalité positive de production d'un bien public, indexée par γ . On peut considérer que si le terme de congestion est le terme dominant ($\theta > \gamma$) alors le bien collectif est un bien commun, et dans le cas contraire, il s'agit d'un bien public ($\theta < \gamma$)(fig. 1.2).

A titre d'illustration, prenons l'exemple d'un périmètre irrigué. Dans un premier cas, le réseau n'est pas en bon état, les agriculteurs peuvent individuellement contribuer à la remise en état des canaux. L'externalité de chaque action individuelle est alors positive, on est dans une situation de bien "public" ($\theta < \gamma$). En revanche, considérons maintenant que le réseau apporte une quantité donnée et fixe d'eau. Chaque agriculteur peut maintenant aller la nuit abîmer les canaux qui passent sur son champ de façon à recueillir l'eau, ou encore payer à boire à l'aiguadier pour que celui-ci lui donne plus d'eau. L'agriculteur ne fait alors qu'augmenter sa part aux dépens des autres, qui est fonction de l'effort qu'il produit relativement à l'effort des autres. Le terme de congestion est alors dominant : $\theta > \gamma$.

Enfin, le bien privé k_i et le bien collectif Z_i entrent dans une fonction de production Cobb-Douglas : $Y_i = k_i^\alpha Z_i^\beta$ qui constitue une mesure directe de l'utilité de l'agent. Le rendement est supposé décroissant : $\alpha + \beta \leq 1$.

Suivant les valeurs respectives de θ et γ on obtient ainsi un bien public, privé ou commun (voir fig. 1.2).

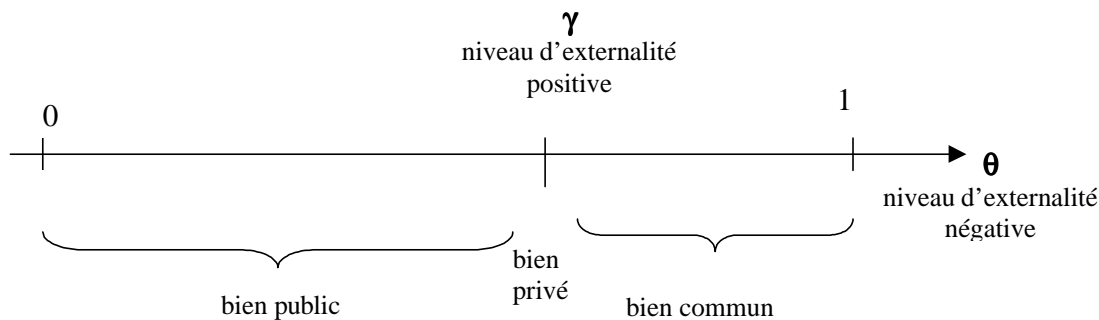


FIG. 1.2 – type du bien collectif en fonction des paramètres de la fonction de production dans Bardhan et al. (2000)

Bardhan et al. montrent alors que l'équilibre de Nash correspond pour un bien commun ($\theta > \gamma$) à un sur-investissement et pour un bien public ($\theta < \gamma$) à une contribution insuffisante.

Ce modèle propose une synthèse mathématique élégante des problèmes d'externalités pour les biens publics et communs. Son interprétation est néanmoins délicate : en effet, l'effort x_i peut être soit à l'origine d'une externalité positive de production, soit d'une externalité négative de congestion mais à mon avis jamais les deux à la fois. L'intérêt de ce modèle réside surtout dans un socle mathématique commun aux RBC et biens publics qui permet, par exemple, de dériver des résultats communs à propos de l'impact de l'hétérogénéité (sous ses différentes formes possibles) sur la production totale du bien.

1.2.3 Rendre compte de la coopération avec des modèles de jeux non coopératifs

Cette partie propose un bilan des différents travaux d'analyse des RBC qui ont tenté de décrire des conditions d'une action collective efficace pour une règle donnée, c'est-à-dire dans le cadre de jeux non coopératifs. Comme cela a été présenté ci-dessus, la coopération peut-être expliquée par des approches qui se situent à des niveaux d'analyse différents :

- 1) les gains du jeu associé au problème voire, de façon plus réaliste, la forme de la fonction de production ;
- 2) la taille du groupe ;
- 3) la structure du jeu, et notamment son éventuelle répétition dans le temps ;
- 4) l'existence possible de normes de comportement ;
- 5) les interdépendances entre le problème de contribution et le problème d'appropriation du bien commun.

La présentation suivante reprend dans cet ordre ces 5 points.

1.2.3.1 Liens entre paramètres du jeu et niveau de coopération

Une partie importante de la littérature sur les biens communs a cherché à expliciter des liens structurels entre certains paramètres et la sous-fourniture de bien public ou le sur-investissement pour l'appropriation d'un bien en commun.

On présente ici d'abord l'impact de la forme générale du jeu sur l'efficacité de l'action collective (sous-partie *a*). Ensuite sera abordée une question qui a mobilisé un grand nombre d'études : l'influence de l'hétérogénéité de certains paramètres au sein du groupe d'agents (sous-partie *b*). Enfin, une brève analyse s'intéressera à l'impact de la valeur moyenne de ces caractéristiques (sous-partie *c*).

a) L'impact de la forme des gains ou de la fonction de production sur le niveau de coopération

La structure du Dilemme du Prisonnier est telle que le seul équilibre de Nash du jeu est celui où les deux joueurs ne coopèrent pas ; c'est en plus un équilibre en stratégies dominantes, i.e. chaque joueur décide de ne pas coopérer quelle que puisse être la stratégie de l'autre joueur.

A la fois Ostrom et al. (1994) et Baland et Platteau (1996) proposent de replacer le dilemme du prisonnier dans le contexte plus général des jeux sous forme stratégique à deux joueurs. Ils montrent que d'autres types de jeux peuvent fournir une grille de lecture pertinente dans le cas d'une RBC.

Ce peut être, par exemple, le cas du jeu d'assurance (qui devrait plutôt s'appeler jeu de convention). Supposons que deux pêcheurs partagent un lac et qu'ils ont tous les deux le choix entre pêcher au filet et pêcher à la dynamite. Pêcher à la dynamite n'est préféré par personne parce qu'un tel mode de prélèvement détruit le stock de poisson à court terme. Néanmoins, si l'un des joueurs choisit de pêcher à la dynamite, l'autre fera de même.

Un autre exemple est celui du jeu "poule mouillée" (*chicken game*). Cette fois-ci, deux agriculteurs se partagent une CUMA¹ de matériel d'irrigation. Il est nécessaire qu'au moins l'un d'entre eux se lève la nuit pour aller vérifier le bon fonctionnement de la pompe commune. Si l'un se lève pour faire le contrôle, l'autre choisit de rester au lit..., et réciproquement.

La figure (1.3) représente les différents équilibres de Nash (en stratégie pure) associés au dilemme du prisonnier et aux deux autres précédents exemples. Pour les trois jeux, les montants indiqués dans les tableaux sont des gains, i.e. il s'agit d'années de "liberté" dans le cas du Dilemme du Prisonnier.

L'étude des jeux à deux joueurs sous forme stratégique a donc permis d'établir une typologie et d'y situer le Dilemme du Prisonnier. Ainsi, dans la forme générale des jeux stratégiques symétriques à deux joueurs (table 1.1), le dilemme du prisonnier est caractérisé par : $b < d < a < c$ (Ostrom et al., 1994). Ostrom et al. (1994) présentent les différents types de jeux possibles en fonction des valeurs respectives de ces coefficients, et comment ces jeux peuvent servir de grille de lecture de tel ou tel problème de ressources en bien commun. De

¹Coopérative d'Utilisation de Matériel Agricole

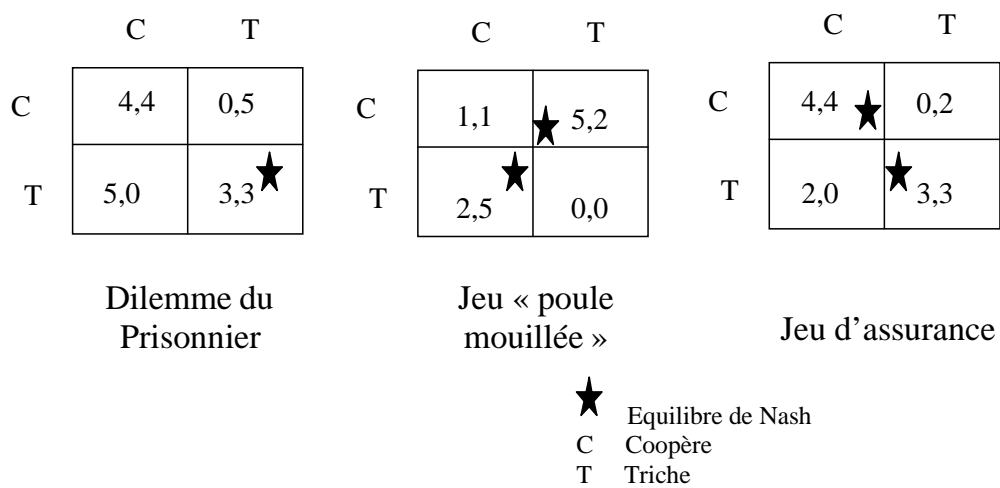


FIG. 1.3 – différents types de jeu à deux joueurs

TAB. 1.1 – forme générale des jeux à deux joueurs

		joueur 2	
		coopère	ne coopère pas
joueur 1	coopère	(a,a)	(b,c)
	ne coopère pas	(c,b)	(d,d)

même, Heckathorn (1996) établit une typologie des jeux à deux joueurs lorsque ceux-ci doivent contribuer à la création d’un bien public. Il situe les différents types de jeu possibles sur un graphe portant en abscisse le degré de convexité de la fonction de production du bien public et en ordonnée la valeur du bien public. Il détermine ensuite la courbe décrite sur ce graphe lorsque le nombre de donateurs varie : cette courbe lui permet de caractériser le type de jeu qui est le plus adapté au système étudié en fonction du nombre de donateurs.

Pour Ostrom (1990), l’intérêt d’un corps de règles de gestion (dont le contrôle et les mécanismes de sanctions) est d’ailleurs de transformer un dilemme du prisonnier en un jeu de coordination dont l’optimum de Pareto est un des équilibres et devient alors stable.

b) L’impact de l’hétérogénéité sur l’action collective

- On peut distinguer trois types d’hétérogénéité :
- sur la position sociale et le type d’intérêt porté à la ressource ;
 - sur la capacité à effectuer l’effort, le paramètre d’hétérogénéité est alors, par exemple, la surface mise en culture, la taille du bateau de pêche, etc. ;

◦ sur *la capacité à profiter de la ressource*, le paramètre d'hétérogénéité est ici la position amont-aval dans un périmètre irrigué ou bien la technologie de pêche utilisée.

En ce qui concerne la première source d'hétérogénéité, les auteurs s'accordent pour estimer de façon générale que les différences d'origine sociale et d'usages de la ressource vont rendre plus difficiles la construction d'une connaissance commune entre les différents agents et ainsi va compliquer la mise en place de structures de régulation (Baland et Platteau, 1996 et Varughese et Ostrom, 2001). Quant aux simulations d'économie expérimentale menées par Cardenas (2000), elles ont montré que, lorsque les agents ont le même gain marginal tiré de la RBC, l'hétérogénéité "sociale" diminue la capacité des gens à coopérer.

Quant aux autres sources d'hétérogénéité, **l'idée initiale et pionnière est celle du livre d'Olson (1965) : l'inégalité augmente le niveau d'action collective car les individus les plus riches ou capables ont une part marginale du profit collectif plus importante, et seront donc prêts à contribuer plus.** Les recherches effectuées depuis ont montré que les choses étaient dans la pratique beaucoup plus complexes.

Il y a en fait un double effet de l'hétérogénéité sur le problème du "1/n", d'après Baland et Platteau (1999). D'une part, comme l'argumente Olson, une augmentation de l'hétérogénéité va conduire à ce que les plus riches internalisent mieux l'effet de leur effort et ainsi contribuent mieux à l'action collective. Mais aussi, d'autre part, cette augmentation va diminuer la (déjà faible) capacité des plus pauvres à internaliser. Il faut regarder au cas par cas comment ces deux effets se conjuguent.

Beaucoup d'auteurs ont proposé des petits modèles non coopératifs pour explorer l'impact de l'hétérogénéité sur l'efficacité de la gestion collective d'une RBC (Baland et Platteau, 1997, 1998, 1999, Dayton-Johnson et Bardhan, 2001, Bardhan, 2000 entre autres). Deux idées peuvent être retenues.

En ce qui concerne la fourniture de bien ou l'appropriation, lorsque les agents ont un revenu tiré du bien commun qui est linéaire avec le paramètre d'hétérogénéité étudié, les modèles montrent que, quel que soit le type d'hétérogénéité, le résultat est ambigu.

De plus, un certain nombre d'articles montrent, de façon plus ou moins explicite, que ***pour un problème de fourniture et d'appropriation, lorsque les agents ont un intérêt qui croît de façon convexe (resp. concave) avec le paramètre d'hétérogénéité, alors l'hétérogénéité conduit à une meilleure (resp. moins bonne) action collective*** (proposition aussi avancée - à défaut d'être démontrée - par Cardenas, 2000)(fig. 1.4).

La question devient donc : ***dans quels cas la "fonction d'hétérogénéité", i.e. la relation entre revenus et paramètre d'hétérogénéité est concave, linéaire, convexe, voire avec une forme en U ou en U inversé ?*** L'ensemble, a priori très épars, des différentes approches sur le sujet pourrait peut-être constituer un début de ***typologie des différentes fonctions d'hétérogénéités possibles*** suivant le type d'hétérogénéité et du contexte de la RBC.

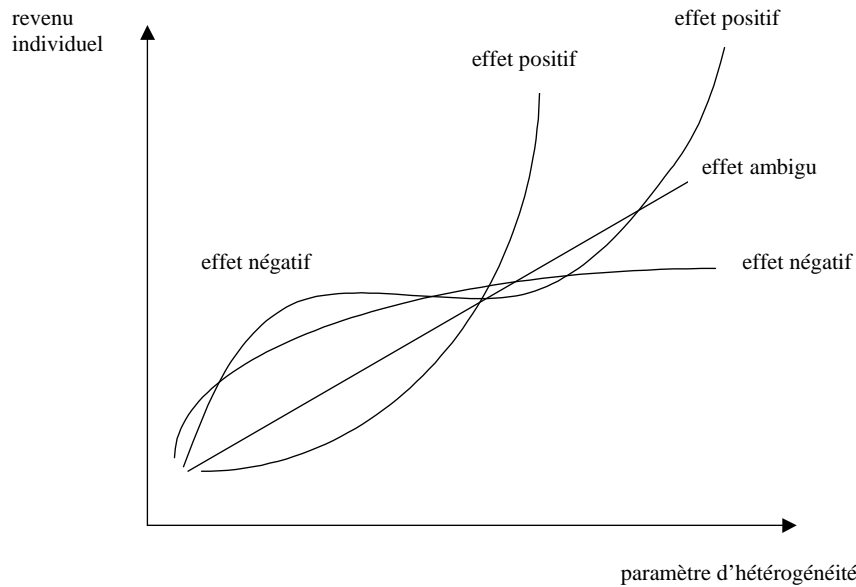


FIG. 1.4 – l'effet sur le revenu total tiré d'une RBC en fonction de la relation entre revenu individuel et paramètre d'hétérogénéité

Parmi tous les modèles traitant de l'hétérogénéité, quelques autres résultats et idées intéressantes valent d'être présentés ici.

α) hétérogénéité dans la capacité à effectuer l'effort

Cette capacité à effectuer l'effort est souvent étudiée sous l'angle de la capacité à fournir un investissement initial : certains agents sont ainsi plus contraints que d'autres en ce qui concerne cet effort initial.

L'augmentation de l'hétérogénéité sur la contrainte n'entraîne pas un gain marginal plus important pour les agents les moins contraints : comme présenté ci-dessus, l'impact de cette hétérogénéité est en général indéterminé.

De plus, le théorème de neutralité qui affirme qu'une redistribution de richesse ne change pas le niveau de contribution pour un bien public (Bergstrom et al., 1986) ne s'applique pas ici parce les RBC ne sont pas des biens purs et parce que la redistribution s'accompagne souvent d'un changement du nombre de donateurs (Baland et Platteau, 1996).

C'est ce que Baland et Platteau montrent, à la fois pour un problème de fourniture de la ressource (B. et P., 1997) et pour un problème d'appropriation (B. et P., 1999). Dans ce dernier article ils prennent ainsi l'exemple d'une communauté de pêcheurs devant se partager une zone de pêche. Les pêcheurs peuvent choisir d'investir un certain nombre de bateaux. L'hétérogénéité dans la capacité à investir peut alors permettre d'améliorer l'action collective, c'est-à-dire de limiter le nombre total de bateaux en mer par rapport à une situation homogène. ***De plus, dans certains cas, l'augmentation de cette hétérogénéité peut conduire***

à une augmentation paretienne, i.e. même les agents qui deviennent plus contraints dans leur capacité à investir voient leurs gains augmenter.

La relation entre le revenu qu'un agent tire de la ressource et le paramètre d'hétérogénéité n'est pas nécessairement constante sur le domaine que ce dernier paramètre décrit. Ainsi, Dayton-Johnson et Bardhan (2001) utilisent un modèle simple de pêche à deux périodes : l'optimum de Pareto est de ne rien pêcher en première période pour que le stock soit le plus important possible pendant la seconde période. L'efficacité est alors une fonction en forme de U de l'inégalité : le revenu total décroît puis croît avec le niveau d'inégalité. De même, dans le cadre du modèle commun aux biens public et commun présenté en début de cette section, le profit total décroît avec l'inégalité pour un bien public suffisamment impur (autrement dit, θ est suffisamment éloigné de 0 ou encore, il existe θ_m tel que $0 < \theta_m < \theta < \gamma$) (Bardhan et al., 2000). Dans les autres cas (bien commun, bien presque pur), les deux évolutions sont possibles.

β) hétérogénéité sur la capacité à profiter de la ressource

Ici, on prend en compte la possibilité que, pour un même effort effectué, des agents tireront un profit (ou de façon plus générale une utilité) qui sera différent d'un agent à l'autre.

En ce qui concerne la fourniture pour la ressource, lorsque les taux de préférence des agents pour le présent sont différents, l'hétérogénéité a un effet ambigu sur la fourniture de la ressource (Baland et Platteau, 1997). De même, en ce qui concerne le problème de l'appropriation, Baland et Platteau (1999), à partir d'un exemple de choix de technologie sur le type de filet de pêche, estiment que l'inégalité dans le nombre de bateaux de pêche possédés par les pêcheurs a un effet ambigu sur l'action collective. Dans ces deux derniers cas, la fonction d'hétérogénéité est effectivement linéaire.

Sur la question de l'impact de l'hétérogénéité sur la capacité à profiter de la ressource, les analyses économétriques donnent des avis divergents. Une analyse économétrique sur des périmètres irrigués mexicains (Dayton-Johnson, 2000b) montre que l'hétérogénéité sur les surfaces a un effet ambigu sur le revenu total alors qu'un autre travail économétrique effectué sur 48 villages d'irrigants en Inde (Bardhan, 2000) détermine que le niveau de coopération est, entre autres, corrélé négativement avec l'homogénéité sur les surfaces possédées, la proximité avec les villes et l'intégration au marché, et positivement avec la petite taille du groupe.

La figure (1.5) présente une brève classification des modèles traitant de l'hétérogénéité selon la forme de la fonction d'hétérogénéité.

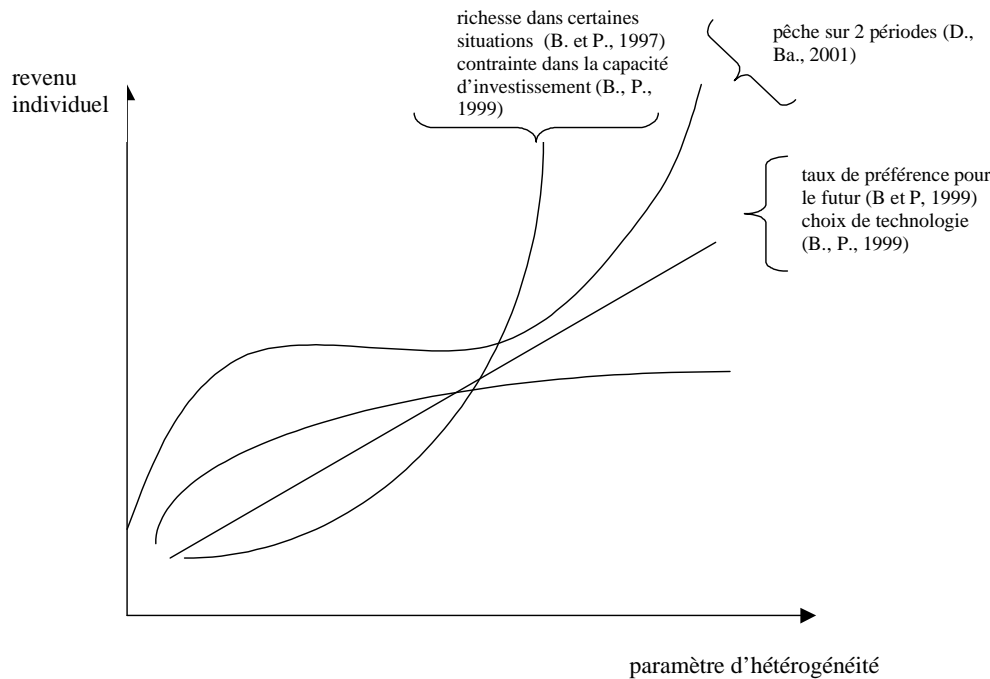


FIG. 1.5 – différents modèles d'impact de l'hétérogénéité suivant la forme de la fonction d'hétérogénéité (B., P. pour Baland et Plateau, D. pour Dayton-Johnson, Ba. pour Bardhan)

c) L'impact des caractéristiques moyennes au sein du groupe sur le niveau de coopération

Si la section précédente traite de la **variance** des caractéristiques, il s'agit plutôt ici de comprendre l'impact de la **moyenne** de ces caractéristiques.

A la fois des modèles théoriques et des résultats expérimentaux ont montré que la richesse moyenne des joueurs pouvait être un facteur facilitant comme limitant pour l'action collective (Cardenas, 2000).

Cependant, lorsque le changement étudié conduit à l'évolution de la cohésion sociale du groupe, son impact sur le niveau de coopération peut être déterminé. Ainsi, lors des simulations d'économie expérimentale effectuées par Cardenas (2000) avec des agriculteurs colombiens, les agriculteurs les plus pauvres sont les plus capables de s'éloigner de l'équilibre de Nash de surinvestissement. En effet, ces agriculteurs ont l'habitude de gérer des RBC au quotidien tandis que les riches agriculteurs, propriétaires de leurs parcelles, ne vivent pas au quotidien les problèmes de Tragédie des Communs avec la même acuité.

1.2.3.2 La taille du groupe

L'idée initialement avancée sur ce sujet (là aussi par Olson) est que, plus le groupe est petit, plus la coopération sera importante.

Pour Ostrom (2001) cependant, la modification de la taille du groupe influe sur de nombreuses variables (coûts de transaction, de contrôle, part de chacun des agents) et

il n'est pas possible de proposer des prédictions théoriques générales quant à l'impact de la taille du groupe sur l'action collective.

De même, selon Wade (repris par Baland et Platteau, 1996), il n'y a pas de taille optimale dans l'absolu. Plutôt que les paramètres techniques (bassin versant...), ce qui compte c'est la structure sociale et notamment l'autorité préexistante. Baland et Platteau (1996) (et avant eux Wittfogel, 1956) donnent des exemples de sociétés très organisées et hiérarchisées où des RBC sur des étendues importantes ont pu être correctement gérées.

Farrell et Scotchmer (1988) analysent le cas d'un ensemble d'agents hétérogènes dans leur capacité à investir pour produire mais qui peuvent bénéficier d'économie d'échelle en se réunissant. Ils montrent que les meilleurs vont se rassembler entre eux, puis les seconds font de même, etc. Les groupes formés sont trop petits et mal composés par rapport à la situation optimale : l'inefficacité provient alors de la capacité des groupes à exclure les agents les moins compétents. Cette approche théorique permet d'expliquer, par exemple, comment se forment des groupes de pêcheurs qui partagent leur activité de recherche des bancs de poissons.

1.2.3.3 La répétition dans le temps

Si le nombre de périodes est inconnu ou infini, un grand nombre de stratégies coopératives peuvent être choisies par l'agent, et ceci à deux joueurs comme à n joueurs (Fudenberg et Tirole, 1991). En général, ces stratégies sont de la forme “donnant-donnant” (“tit for tat”) : une coopération initiale associée à une punition temporaire ou définitive face à un partenaire qui aurait triché.

1.2.3.4 Essayer de formaliser l'existence de normes

De nombreuses simulations d'économie expérimentale ont montré que le comportement des agents ne pouvait être complètement expliqué par le seul choix rationnel de la meilleure stratégie dans un cadre non coopératif.

- L'efficacité des discussions informelles n'est pas prise en compte

Les modèles de jeu ne prennent pas en compte ces discussions informelles (*cheap talks*) qui permettent aux agents d'apprendre à se connaître.

- La présence de comportements moraux

La mise en place d'un mécanisme de sanctions est un bien public : il est sujet à un problème de passager clandestin. La théorie prédit alors une sous-fourniture, alors que dans des simulations d'économie expérimentale, les usagers à qui on donne la possibilité d'engager des systèmes de sanction sont prêts à en payer le coût.

Une autre expérience vient appuyer ce point. Supposons qu'un joueur A décide de partager une somme qu'il a reçu, par exemple 100, entre ce qu'il garde pour lui et ce qu'il donne à un joueur B. Ensuite, le joueur B peut décider soit d'accepter, soit de refuser, ce qui conduira alors à un gain nul pour les deux joueurs. En pratique, B refuse si sa part est inférieur à un montant de l'ordre de 30 en moyenne, alors que, de façon rationnelle, il devrait accepter quel que soit le gain non nul que lui propose A.

Enfin, dans le cadre de ses études d'économie expérimentale menées auprès d'agriculteurs colombiens, Cardenas (2000) a utilisé des paramètres relatifs aux différents niveaux d'information pour voir comment ils étaient mobilisés par les joueurs : habitude à utiliser au quotidien des RBC, degré de connaissance des autres joueurs, etc. Cardenas montre ainsi que les agents coopèrent mieux lorsqu'ils ont l'occasion de discuter face-à-face entre chaque pas de temps du jeu que s'il existe une régulation externe sous forme d'audit aléatoire des actions des joueurs. Les discussions face-à-face permettent une meilleure efficacité de la gestion de la ressource bien qu'elle ne débouchent sur aucun engagement vérifiable. Les théories précédentes échouent à expliquer un tel résultat.

Il y a donc des situations où les joueurs font preuve d'une morale qui transforme les gains initiaux en gains subjectifs. Deux questions se posent alors :

- **quel statut donner à la morale dans les modèles de jeu ?**
- **dans quelles situations les joueurs font-ils preuve de morale et dans quelles situations n'en font-ils pas ?**

Deux esquisses de réponse ont été proposées récemment : la théorie des jeux évolutionnistes pour la première, une classification des catégories d'information mobilisées par les agents pour la seconde.

a) Apports de la théorie des jeux évolutionnistes

Dans le cadre de la théorie des jeux évolutionnistes, chaque agent utilise une **ligne d'action donnée**, par exemple un sens moral qui le conduit à coopérer systématiquement.

La population du jeu est composée d'agents utilisant différentes stratégies. Ces agents se rencontrent au hasard et jouent alors un jeu donné. A la fin de la période, les agents qui auront gagné le plus verront leur proportion dans la population totale grandir. Lorsqu'on applique cette théorie à l'étude de l'évolution en biologie, l'interprétation habituelle est que les populations obtenant les gains les plus importants se reproduiront mieux. **Appliquée à l'économie, une interprétation assez naturelle est que, à la fin d'un pas de temps, un certain nombre d'agents change d'avis, et ce proportionnellement aux gains et pertes relatifs entre les différentes stratégies.** Ainsi, selon ce point de vue, les agents ne sont pas capables d'estimer l'efficacité de toutes les stratégies possibles mais ils peuvent modifier la stratégie utilisée au cours du jeu : c'est une façon intéressante de prendre en compte une rationalité limitée.

On définit alors une stratégie "évolutionnistement" stable comme une stratégie qui, jouée par l'ensemble d'une population, est capable de "résister" à l'invasion par des agents utilisant une stratégie différente (Weibull, 1995 et 1999). Un équilibre de Nash en stratégie mixte correspond alors simplement à un équilibre entre deux populations de stratégies différentes.

Sugden (1986, cité par Baland et Platteau, 1996) a montré que, dans le cas du dilemme du prisonnier, la stratégie *tit for tat* est évolutionnistement stable : elle est capable de s'imposer face à des agents coopérants toujours ou trichant toujours.

Bester et Güth (1998) définissent une théorie évolutionniste “indirecte” : ils proposent de modifier les gains du jeu (par exemple le dilemme du prisonnier) en fonction du coût ou du gain “moral” pour un agent de coopérer ou de tricher². Ils étudient l’interaction entre deux joueurs qui choisissent chacun un effort (x pour l’agent 1, y pour l’agent 2), avec une externalité mutuelle positive ou négative. L’altruisme est modélisé par le fait que les joueurs peuvent prendre en compte, dans leur fonction d’utilité, une part ($1 - \alpha$ pour le joueur 1, $1 - \beta$ pour le joueur 2) du profit du partenaire. Alors, plus cet altruisme est important, plus les joueurs vont pouvoir se rapprocher de l’optimum de Pareto (fig. 1.6).

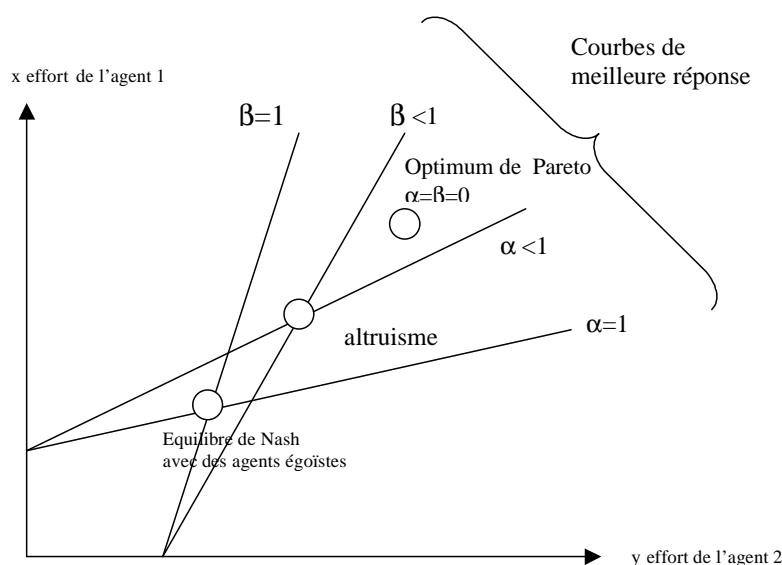


FIG. 1.6 – courbes de réponse et solutions à l’équilibre dans un jeu à deux joueurs pouvant être altruistes (d’après Bester et Güth, 1998)

Bester et Güth cherchent à comprendre ensuite si un niveau non nul d’altruisme peut être évolutionnistement stable. L’idée sur laquelle est fondée la démonstration est la suivante. Si le joueur 1 est plus altruiste, alors 2 sait que 1 va mieux prendre en compte son propre choix et va augmenter son effort. Alors, si l’externalité est positive, l’augmentation d’effort de 2 sera bénéfique pour 2 tandis que si elle est négative, elle lui sera nuisible.

Le résultat est alors qu’avec une externalité positive, un niveau d’altruisme non nul est la seule stratégie évolutionnistement stable, tandis que si l’externalité est négative, seul l’égoïsme est évolutionnistement stable.

Cependant, en cas d’externalité positive, lorsque la population est initialement composée d’égoïstes et d’altruistes, si les agents ne connaissent que la proportion de chacun des types, alors le type altruiste décline, sauf s’il existe un bruit. **Ceci peut expliquer l’importance sur le terrain et en économie**

²L’idée de faire appel à une “morale” pour résoudre un problème de Tragédie des Communs avait d’ailleurs été envisagée par Hardin en 1968 mais il l’avait rejetée, la jugeant peu réaliste.

expérimentale des discussions non contractuelles entre agents avant la prise de décision (*cheap talks*).

Cardenas et Ostrom (2001) estiment ainsi que trois éléments ressortent pour expliquer la coopération :

- le type de situation (par exemple un jeu répété) ;
- quand il y a une certaine probabilité de rencontrer des gens du même type ;
- lorsque les institutions en place donnent des bonus non monétaires (prestige, réputation...) au fait de coopérer.

Cette approche théorique permet alors d’asseoir l’intérêt des institutions pour la mise en place de la coopération, parce qu’elles (i) créent des normes sociales, (ii) réunissent de l’information sur les types des gens, (iii) mettent en place des systèmes de récompense et de punition.

b) L’utilisation des normes dépend du contexte de jeu

Cardenas et Ostrom (2001) proposent d’ordonner les couches d’informations utilisées par un agent de la façon suivante (fig. 1.7) :

o la couche du jeu statique

C’est le niveau de la matrice des revenus, les actions possibles et les gains associés.

o la couche du jeu dynamique

Ce niveau correspond à l’information acquise à partir des jeux précédents.

o la couche du contexte du groupe

Il s’agit de l’information sur les autres agents et notamment sur leur propension à coopérer.

o la couche de l’identité

C’est le fait de donner, dans ses choix, de l’importance à coopérer ou non.

Suivant la structure du jeu (et évidemment les informations disponibles), le joueur se concentrera sur telle ou telle couche pour prendre sa décision, parce que l’acquisition de l’information sur les autres (couche 2 et 3 : issues des jeux passés, comportements des joueurs dans d’autres contextes que celui du jeu) peut avoir un coût.

Ainsi, dans le cas d’un marché parfait ou, à la Coase, lorsque les coûts de transaction sont nuls, seule la première couche est prise en compte. En revanche, lorsque les coûts de transaction nécessaires à l’établissement de contrats réduisant les externalités sont trop importants, la présence de ces externalités va conduire l’agent à mobiliser les autres niveaux d’information. Il sera prêt à prendre le temps de discussions informelles avec les autres joueurs pour voir si ces derniers ont un comportement moral qui les conduit à coopérer de préférence, même si ces discussions ne donnent lieu à aucun engagement vérifiable par la suite.

En fonction des différents niveaux d’information mobilisés, le joueur va transformer les gains initiaux “objectifs” en gains “subjectifs” qui pourront peut-être transformer la structure initiale du jeu d’un Dilemme du Prisonnier vers un jeu d’Assurance ou de Poule Mouillée.

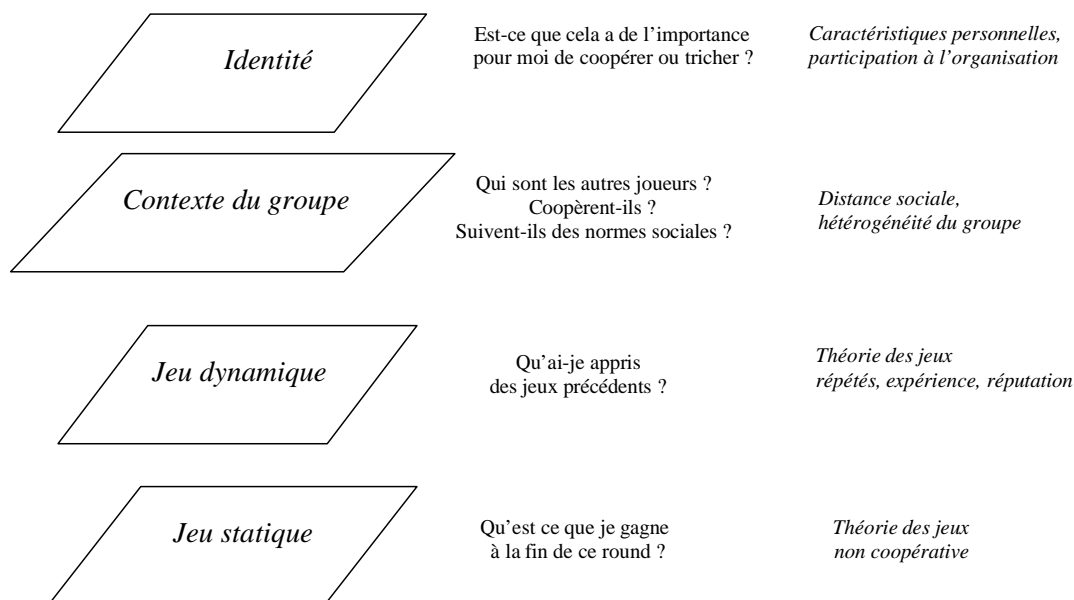


FIG. 1.7 – les différents niveaux d'information mobilisés par un joueur (d'après Cardenas et Ostrom, 2001)

1.2.3.5 Etude conjointe des problèmes de sous-effort et de sur-effort

Faire en sorte que les incitations au sous-effort et au sur-effort se compensent

Dans certaines pêcheries japonaises, la mutualisation des revenus permet d'abord d'inciter au partage du savoir, mais aussi de limiter le sur-investissement (Gaspard et Seki, 2000). Ce sur-investissement inhérent à toute activité de pêche est en effet compensé par l'incitation à se conduire en passager clandestin pour la production collective.

De même, Schott (2001) cherche la taille optimale de regroupement de pêcheurs de façon à ce que la compensation de ces deux effets aboutisse à la pression optimale de pêche. Selon lui, l'avantage de cette approche est aussi qu'on n'a pas alors besoin de redéfinir des droits de propriété.

En fait, si les joueurs maximisent leur profit, alors seule compte la taxe qu'ils supportent et ce système est équivalent à une taxe pigouvienne : si la taxe est faible, il y a un problème de sur-investissement, tandis que si en revanche elle est trop forte, il y a un problème de sous-investissement, les deux pouvant être vus comme des effets de passagers clandestins. Il existe ainsi un niveau de taxe (i.e. un niveau de partage des profits) qui permet d'atteindre l'optimum collectif. Le modèle avec partage du profit diffère simplement dans le sens où le produit de la taxe est redistribué, ce qui politiquement souhaitable.

En revanche, si les joueurs cherchent à la fois à atteindre un revenu seuil et à fournir un minimum d'efforts, alors l'effet de "passager clandestin" créé par le partage des revenus peut jouer un rôle bien distinct de celui de la taxe.

La nécessaire congruence entre règles de fourniture et règles d'allocation

Dayton-Johnson (2000a) étudie 48 périmètres irrigués au Mexique. Il montre, à la suite d'Ostrom (1992), la nécessaire congruence entre les règles de partage des coûts de maintenance et d'allocation de l'eau.

Dans le modèle de De Janvry et al. (1998), les agriculteurs vont contribuer en début de période à la production de la ressource commune en fonction du niveau de coopération sur l'appropriation. Dans ce cadre, la communauté a intérêt, pour assurer un bon niveau de coopération, à mettre en place des mécanismes de contrôle (voir aussi p. 158).

1.2.4 La négociation sur les règles de gestion des RBC

Une approche possible pour aborder cette question est la théorie des jeux coopératifs. Dans le domaine de l'environnement, cette théorie s'est jusqu'à maintenant principalement intéressée à la négociation sur les biens communs globaux (effet de serre, ozone, etc.), parce que ce sont des situations où il n'y a pas d'Etat supra-national qui pourrait dicter les "bonnes" décisions mises en avant par la théorie économique.

L'hypothèse commune de ces modèles est que, puisque chaque pays est libre de signer un traité, il faut assurer que chaque participant gagne à participer plutôt qu'à rester en dehors de la convention. Par exemple, pour Germain et van Steenverghé (2001), cette contrainte d'acceptabilité laisse peu de place pour la mise en place d'une répartition initiale qui essaierait d'être équitable.

En revanche, dans le cadre des RBC, l'utilisation de la théorie des jeux coopératifs est encore très faible.

Gardner et al. (2000) étudient des règles de limitation proportionnelle pour diminuer l'exploitation de RBC. Ils déterminent le niveau de réduction qui sera adopté à la majorité.

Walker et al. (2000) mettent en œuvre une simulation d'économie expérimentale où les joueurs prélèvent individuellement dans une RBC. A partir de la situation initiale non régulée, les joueurs ont la possibilité de proposer une allocation de la ressource, les différentes propositions étant ensuite soumises à un vote qui peut être effectué soit à la règle de la majorité soit à l'unanimité. Ces règles votées permettent d'augmenter considérablement l'efficacité totale, le vote à l'unanimité étant lui-même plus efficace que le vote à la majorité.

Funaki et Yamato (1999) s'intéressent à la capacité d'agents identiques à négocier pour éviter la tragédie des communs. Ils montrent que l'existence du cœur est fortement conditionnée à l'hypothèse que fait chaque coalition sur la possibilité de formation de coalition chez ceux qui ne font pas partie de la coalition (les "outsiders").

- Si chaque coalition fait des prévisions optimistes, i.e. pense que les *outsiders* vont tous se réunir, alors le cœur peut être vide.

- En revanche, si chaque coalition fait des prévisions pessimistes, i.e. pense que la coalition des *outsiders* va faire en sorte que le résultat soit le plus mauvais pour elle, alors le cœur existe toujours. Dans le modèle présenté, cette prévision consiste à penser que chaque *outsider* va jouer seul de façon non coopérative. Une telle hypothèse est réaliste dans le cas de nombreuses RBC.

En fait, les positions "optimistes" et "pessimistes" renvoient à deux concepts importants de la théorie des jeux coopératifs (théories α et β , c.f. Shubik, 1982). Bien que très simple, le résultat de Funaki et Yamato est à mon avis prometteur quant à l'utilisation de modèles de jeux coopératifs pour l'analyse des RBC.

Au niveau du choix des règles d'allocation, il est aussi possible de devoir faire face à un problème d'action collective tel que décrit dans la section précédente. Ainsi, parfois, par

rapport à la situation initiale, il peut exister une règle qui constitue une amélioration à la Pareto avec néanmoins un coût à réunir les différents acteurs puis à proposer cette règle. Ce sont alors les acteurs qui obtiendront le plus de cette réforme qui seront les plus disponibles pour initier le changement : nous retrouvons la discussion précédente sur l'impact de l'hétérogénéité du groupe d'agents.

Impact de l'hétérogénéité

L'analyse de l'impact de l'hétérogénéité sur les résultats de la négociation est de nature très différente de celle qui précède portant sur l'impact de l'hétérogénéité sur le niveau de coopération, dans le cadre d'une règle d'allocation donnée. En effet, l'augmentation de la contribution pour créer ou entretenir une ressource est bénéfique pour tous les agents. En revanche, en ce qui concerne la création de règles de régulation, il faut comparer deux situations, en général une situation initiale non régulée et une situation potentielle régulée. Le passage peut parfois conduire à une baisse des gains pour une certaine partie des agents. L'impact d'une hétérogénéité est assez simple à modéliser avec des jeux de marchandage, il est plus difficile avec des modèles de jeux coalitionnels. En ce qui concerne l'hétérogénéité dans la capacité à effectuer un effort, il n'y a pas de résultats à ma connaissance.

Quant à l'hétérogénéité sur la capacité à profiter de la ressource, l'idée générale est que si, de manière générale, la régulation permet une meilleure valorisation collective, il est parfois possible qu'un agent valorisant la ressource mieux que les autres ait à perdre au passage d'une situation non régulée à une situation régulée, fondée sur des quotas uniformes par exemple. Cette situation est d'autant plus probable que le groupe est plus hétérogène.

Baland et Platteau (1998) prennent ainsi l'exemple de deux joueurs utilisant une même ressource, par exemple un lac, et pour laquelle l'effort total effectué va diminuer la valeur future de la ressource. Dans un premier cas, les agents ont des taux de préférence pour le présent différents et dans un deuxième cas ils n'ont pas la même compétence. Baland et Platteau montrent que, dans les deux cas et lorsqu'on s'interdit des transferts monétaires, l'hétérogénéité a un effet négatif sur la mise en place d'une règle.

La possibilité d'effectuer des transferts monétaires permet en théorie de résoudre le problème. En pratique, dans beaucoup de communautés, ces transferts ne sont pas utilisés, pour des raisons éthiques ou bien de définition des droits.

A partir de son étude sur 48 périmètres irrigués au Mexique, Dayton-Johnson (2000b) compare des règles de type *ex ante* et *ex post* et montre que l'inégalité relative à la taille des surfaces possédées est corrélée positivement avec le fait que la communauté choisisse une règle de type "proportionnel".

En conclusion, en ce qui concerne la création de règles, la situation régulée peut profiter ou au contraire être défavorable par rapport à la situation non régulée pour les individus riches quel que soit le lien entre l'intérêt porté par les usagers sur la ressource et le paramètre d'hétérogénéité : les résultats sont ambigus.

1.2.5 Dans quelle mesure les modèles de théorie des jeux rendent-ils compte des comportements observés ?

Un constat général paraît émerger : **l'équilibre de Nash donne une bonne description du résultat collectif d'interactions à la fois dans des situations réelles et en économie expérimentale, à la condition que les agents ne puissent communiquer et que, de façon générale, un "construit social" soit impossible** (Ostrom, 2000a et 2000 in McGinnis).

Par ailleurs, Ito et al. (1995) estiment que le sur-investissement observé dans de certains cas par rapport à l'équilibre de Nash peut s'expliquer par le fait que les agents ne maximisent pas seulement leur bien-être propre mais cherchent aussi à augmenter leur différence de revenu avec les autres.

Cependant, les études de cas et l'économie expérimentale montrent que la théorie ne parvient pas à prendre en compte les deux aspects suivants.

- Une rationalité encore trop peu limitée

Si l'équilibre de Nash donne une bonne représentation collective des stratégies, en revanche, **les joueurs, individuellement, n'appliquent pas les stratégies d'équilibre de Nash**. Dans une expérience d'économie expérimentale, Keser et Gardner (1999) montrent que les choix des étudiants aboutissent globalement à l'équilibre mais que moins de 5% des étudiants appliquent la stratégie de l'équilibre de Nash.

De plus, le comportement observé n'est pas cohérent avec le raisonnement à rebours dans des jeux répétés un nombre fini de fois.

Enfin, de façon générale, la théorie ne prend pas en compte la façon d'apprendre par "essais et erreurs" utilisée par les individus.

- La théorie s'est peu intéressée à la possibilité des agents de négocier pour changer les règles de gestion.

D'un point de vue théorique, l'approche de Funaki et Yamato (1999) est très prometteuse mais elle est encore loin de pouvoir illustrer des cas d'étude concrets.

1.2.6 Apport de l'analyse économique sur le débat autour des RBC

Modifier le régime de propriété pour éviter la tragédie des communs ?

A la suite de l'article d'Hardin, deux approches ont été proposées pour éviter la tragédie des Communs (Berkes et al., 1989).

- o La première approche consiste à définir des **droits de propriété individuels transférables**. On sait que l'optimum est atteint lorsque les marchés sur ces droits sont complets et les coûts de transaction sont nuls. Cependant, par définition même des RBC, ces hypothèses ne sont pas vérifiées.

On peut aussi envisager que, même si les marchés sont incomplets, la négociation permette d'atteindre l'optimum, comme le prévoit le théorème de Coase. Mais il faut là aussi que les coûts de transaction soient nuls et de plus, à partir de trois joueurs, il est possible que l'espace de négociation n'ait pas de cœur (Baland et Platteau, 1996), c'est-à-dire qu'il n'existe pas d'arrangement pour lequel aucune coalition ne fait mieux

seule. Enfin, dans un cas comme dans l'autre, une asymétrie d'information entre les agents peut rendre impossible le succès de la négociation.

o La deuxième approche consiste à **nationaliser la ressource** : cette solution a souvent été choisie dans de nombreux pays d'Afrique et d'Asie dans les années suivant leur indépendance. Se posent alors à la fois un problème de moyens pour contrôler l'accès à la ressource et un problème d'asymétrie d'information entre l'Etat et les usagers. **Très souvent, la nationalisation a abouti à un état de fait d'accès libre.**

Quelle est la meilleure solution institutionnelle ?

Dans la situation idéale d'absence de coûts de transaction et d'absence d'asymétrie d'information, les deux solutions précédentes (nationaliser ou définir des droits individuels transférables) permettent d'atteindre l'optimum et sont donc équivalentes. Dans la quasi-totalité des cas en pratique, les situations réelles sont très éloignées d'une telle situation idéale.

Tout un courant de littérature organisé autour de l'IASCP ³ et dont la figure emblématique est E. Ostrom, montre alors que la gestion en bien commun peut être dans certains cas plus efficace que la nationalisation ou un marché de droits individuels transférables. **Il n'y a donc pas de solution générale au problème du "1/n" qui puisse provenir d'un régime de propriété précis. Il faudra donc estimer, au cas par cas, quel est le meilleur régime de propriété parmi les trois régimes de propriété possibles.**

Quels intérêts et limites des RBC, face notamment aux imperfections du marché ?

Les RBC permettent de répondre à la fois aux imperfections du marché dans le domaine de l'assurance mais aussi à celles du marché de la main d'œuvre et du crédit : dans des zones de fort chômage, les plus pauvres ont souvent en effet pour seules ressources les RBC (Baland et Platteau, 1996).

La gestion d'une Ressource en Bien Commun peut permettre de partager le risque en absence de marché d'assurance (voir le chapitre 3 pour une revue bibliographique et une analyse de cette question).

L'allocation de la ressource peut être aussi l'occasion d'**effectuer une redistribution sociale**. Ray et Ueda (1996) font le lien entre cette possibilité et le problème de contribution pour la production d'une RBC. Ils se placent dans le contexte où des agents doivent individuellement contribuer pour la production d'un bien public, bien public qui sera ensuite *ex post* distribué de façon à maximiser la fonction de bien-être social donnée. Cette fonction pondère les critères d'efficacité et d'égalité : elle peut aller de la fonction utilitaire, de Bentham (somme des utilités) à la fonction égalitaire de Rawls (minimum des utilités). Puisque que la collectivité répartit toujours au mieux *ex post*, les agents ne fournissent pas assez *ex ante* (sauf dans le cas où la fonction de bien-être est la fonction de Rawls). Par ailleurs, plus la fonction de bien-être est égalitaire, meilleure sera l'action collective (Ray et Ueda, 1996).

Gaspart et Seki (2000) étudient des institutions qui mettent en œuvre un partage du revenu. Ces institutions permettent une fourniture efficace des biens publics par le

³International Association for the Study of Common Property

biais d'un partage de la connaissance de la ressource et des techniques de production. Gaspart et Seki montrent que ces institutions peuvent aussi donner naissance à des normes sociales qui incitent les agents les moins compétents à travailler plus tandis que les agents plus productifs travaillent moins : de telles normes permettent alors de rendre les revenus plus homogènes.

Dans quelle mesure ces apports théoriques permettent-ils d'enrichir le débat sur le meilleur régime de propriété et la bonne structure de gestion ?

Les modèles théoriques appliqués aux problèmes de ressource en bien commun ont eu et ont toujours une importance dans la définition de politiques publiques. Cette influence ne s'est pas limitée au débat sur le régime de propriété. Ainsi, le modèle actuel de gestion des pâturages issu de la "New Range Ecology" a conduit à des politiques de subvention et de limitation des pertes subies pendant les années de sécheresse (McCarthy, 2001). L'approche proposée par McCarthy montre qu'une telle politique se traduira automatiquement par une augmentation des prises de risque, i.e. la densité de bétail, sur les parcours en bien commun. Elle estime donc que de telles politiques d'assurance devraient être accompagnées de mesures d'aide à la mise en place d'une gestion au niveau local pour éviter cette augmentation du cheptel.

Aider à la mise en place de la coopération

La formalisation en termes de théorie des jeux peut aider à comprendre comment modifier la forme du jeu (les stratégies envisageables et les matrices de gain) de façon à ce que la coopération soit une issue envisageable, i.e. un des équilibres de Nash du jeu. Par exemple, pour une règle donnée, on cherchera à passer d'une situation de dilemme du prisonnier à un jeu d'assurance : le problème se transforme alors en un problème de coordination entre joueurs pour atteindre l'optimum de Pareto.

Evidemment, comme cela a été argumenté ci-dessus, la définition de nouvelles règles n'est pas suffisante seule : il faut aussi déterminer comment l'institution de choix des règles peut inciter les joueurs à mettre en place une règle de gestion.

Vers la co-gestion des RBC

L'analyse théorique et les politiques mises en œuvre s'orientent de plus en plus vers des solutions mixtes de partage des responsabilités entre Etat et communautés locales. Baland et Platteau (1996) proposent plusieurs cas où l'Etat peut jouer un rôle.

1) Fournir une assistance technique pour estimer l'impact des scénarios envisagés et convaincre de l'intérêt d'une gestion active. On rejoint ici la position adoptée souvent aux Etats-Unis pour des problèmes environnementaux, où les usagers négocient entre eux tandis que les offices techniques de l'Etat fournissent des données sur le fonctionnement du système (voir la négociation sur l'exploitation des aquifères californiens, Blomquist, 1992).

2) Donner des incitations économiques éventuellement pour que les usagers ne suivent pas une trajectoire de destruction de la ressource mais de conservation de celle-ci.

3) Donner un cadre légal qui reconnaîtra les décisions prises localement, ce qui est d'ailleurs un des principes défendus par Ostrom (1990). Cette reconnaissance légale est d'autant plus importante que l'intégration au marché conduit à un affaiblissement des capacités des institutions traditionnelles de gestion des RBC, et ceci pour trois raisons : (i) l'autorité traditionnelle voit son pouvoir s'éroder, (ii) le capital et le travail

deviennent plus mobiles, (iii) les nouveaux besoins de consommation diminuent le taux de préférence pour le futur.

4) Résoudre les conflits qui ne peuvent se faire à l'échelle locale, par exemple des problèmes de pollution entre communautés et industries.

5) Assurer un soutien technique et financier pour les activités de contrôle et de sanction. De plus, l'Etat ne peut pas toujours contractualiser avec toutes les communautés directement : pour des questions de coûts de transaction, il peut être intéressant de concevoir des organisations intermédiaires, par exemple des associations de communautés locales. On rejoint ici un autre principe défendu par Ostrom (1990) : la définition de couches de décision imbriquées pour gérer des systèmes d'étendue importante.

Quelques études récentes (Baland et Platteau, 1996, Edmonds, 2001) présentent des exemples de co-gestion réussie.

1.2.7 Conclusions et perspectives de recherche

Nous présentons ici les grandes directions de recherche qui émergent de la revue de littérature précédente, puis comment le sujet de la thèse s'insère dans ces perspectives.

Les principales perspectives de recherche

Parmi l'ensemble des analyses exposées au-dessus, trois directions de recherche plutôt théorique peuvent être retenues.

a) A terme, il est nécessaire d'aborder la gestion des ressources en bien commun avec **des modèles de rationalité limitée** (Ostrom, 2000a et Keser et Gardner, 1999). Cette théorie devra intégrer des normes, i.e. une valeur interne que l'individu donne à telle ou telle action, ou bien des règles, qui sont une conception partagée au sein d'un groupe que certaines actions doivent être faites dans certains cas et qu'il faut punir les contrevenants. Une norme majeure qui sera à prendre en compte est la réciprocité, dont la stratégie "donnant-donnant" (*tit for tat*) est un exemple. Comme pour la définition d'un capital social, il y a néanmoins le risque de faire un "chèque en blanc".

b) Encore beaucoup de modèles actuellement utilisés, notamment pour mesurer l'impact de l'hétérogénéité, sont des modèles à 2 joueurs. Ces modèles surestiment de fait l'impact de l'action de chaque joueur sur le bien collectif. Il nous semble beaucoup plus réaliste de s'intéresser à des **modèles à n joueurs**, quitte à estimer dans l'équilibre de Nash que le joueur ne prend pas en compte l'impact de son propre effort sur le bien collectif dans son choix de stratégie ($\frac{dX}{dx_i} \simeq 0$). Les résultats d'une analyse à deux et à n joueurs peuvent être qualitativement assez différents.

c) Dans l'ensemble, l'analyse s'est souvent uniquement intéressée au niveau "application des règles", sans s'intéresser et voire en oubliant le niveau "choix des règles". **Il faut bâtir une théorie de la négociation appliquée au contexte des RBC.** L'approche de Funaki et Yamato (1999), qui consiste à aborder une formulation standard d'une RBC avec un modèle de jeu coopératif, me semble très prometteuse.

Deux autres perspectives de recherche, plus appliquées, apparaissent aussi importantes.

d) Il reste un **lien à faire entre la vaste littérature sur les outils de l'économie de l'environnement (quotas, taxes, permis, etc.) et l'analyse économique des RBC.** Cette dernière s'est concentrée sur la nature des droits de propriété et sur

l'influence des paramètres du système, mais il y a peu de travaux sur la comparaison des différents outils de gestion dans le cadre des RBC.

e) Les modèles de jeux ont montré que, suivant les types de jeu, les gains, etc., il pouvait se passer à peu près tout : le spectre de l'inévitable dilemme du Prisonnier est loin maintenant... De plus, la plupart des contributions qui ont cherché à relier théorie et comportement observé sont fondées sur de l'économie expérimentale. Pour ces deux raisons, il me semble important de **fonder des modèles au cas par cas à partir d'études de terrain détaillées**, avec des fonctions de production et une structure du jeu plus réalistes.

Positionnement du travail de thèse

Par rapport au cadre théorique d'analyse des RBC présenté ci-dessus, le travail de recherche n'étudie que les problèmes d'**appropriation** ; de plus il porte pour l'essentiel sur l'impact de règles données sur les choix des agriculteurs, i.e. en restant au niveau de l'"application des règles". L'impact de l'hétérogénéité sera étudié pour deux types d'hétérogénéité : la capacité à valoriser la ressource et la fonction d'utilité des agriculteurs.

L'originalité de l'approche choisie consiste à :

- **comparer différentes formes d'allocation existantes et envisageables**, dans le cadre de l'appropriation d'une ressource en bien commun où les agriculteurs peuvent faire des investissements individuels pour bénéficier d'une ressource collective ;
- **utiliser un modèle avec n agriculteurs** ;
- **utiliser un modèle peu générique mais assez adapté à l'allocation de l'eau dans un système irrigué**, ce qui permet de faire un lien direct avec des études de terrain.

Par conséquent, par rapport aux perspectives de recherche actuelles présentées ci-dessus, nous estimons que notre travail s'inscrit dans les points **b,d** et **e**.

Enfin, nous cherchons à établir ce que chaque agent perd ou gagne pour une règle donnée, au niveau "application des règles". Ces résultats peuvent servir de base pour élaborer une approche théorique du niveau "choix des règles" : nous en abordons quelques prémisses au chapitre 5, sans toutefois tenter de bâtir une théorie générale.

1.3 Position par rapport à l'analyse des instruments de gestion de l'eau

La thèse de Montginoul (1997) et la revue de littérature de Johansson (2000) proposent un bilan des différents outils économiques de gestion de l'eau. Montginoul établit une classification générale de ces instruments : la tarification, les quotas et les marchés de l'eau. Elle étudie la capacité de ces différents outils à atteindre les objectifs présentés au chapitre préliminaire, i.e. l'efficacité en terme de valorisation économique, l'équité et l'équilibre budgétaire.

Les principales questions traitées par cette littérature sont la comparaison entre tarifications au coût moyen et au coût marginal, ou entre tarification proportionnelle et binôme, dans le cas particulier de la gestion de l'eau. Une littérature importante existe aussi sur la mise en place des marchés de l'eau et notamment la prise en compte des

externalités lors des transferts (voir l'édition d'automne 1997 du Natural Resources Journal).

Par rapport à cette recherche et au champ de littérature qui y est présenté, les limites et l'originalité de notre travail résident dans les trois points suivants.

- Comme présenté dans le chapitre préliminaire, nous considérons que la ressource ne peut être modifiée par les usagers et que la demande en eau est suffisante pour payer les coûts de production. Par conséquent, la tarification sera utilisée dans sa capacité à inciter des comportements et éventuellement à révéler de l'information et non dans l'idée d'assurer le financement des coûts de production.
- Nous essayons d'explicitier la fonction de demande, i.e. la réaction globale des usagers face à une règle donnée. Cette réaction globale peut être la simple somme de réactions individuelles indépendantes mais elle sera surtout étudiée comme la résultante d'interactions stratégiques entre les agriculteurs.
- Notre étude s'intéresse plus à des situations de Ressources en Bien Commun qu'à une situation de rapport Producteur/Acheteur d'eau. En ce sens, par la suite, nous considérerons que les bénéfices extraits d'une tarification sont intégralement reversés aux différents usagers.

1.4 Liens avec la théorie des choix publics

Une question que traite la théorie des choix publics est la suivante : une collectivité doit produire puis partager un bien entre plusieurs individus dont elle ne connaît pas les préférences individuelles. La collectivité va allouer à chaque agriculteur i une quantité du bien q_i en le faisant payer x_i , de telle sorte de vérifier les contraintes collectives de production $Q = F(X)$ avec $X = \sum x_i$ et d'allocation $Q = \sum q_i$. Une fois les règles d'allocation et de partage des coûts annoncées, chaque agent va faire une demande \tilde{q}_i . La collectivité alloue alors $q_i = f(\tilde{q}_1 \dots \tilde{q}_n)$, au prix $x_i = g(\tilde{q}_1 \dots \tilde{q}_n)$. Le profit de l'agent i est alors $\pi_i = h_i(q_i, x_i)$ ⁴.

La théorie des mécanismes de révélation* s'intéresse ainsi à la définition de règles telles que chaque agent a intérêt à annoncer son réel besoin.

Nous étendons la question précédente à la situation où la *demande* effectuée par l'agriculteur est en fait un *investissement en début de campagne*, investissement qui va déterminer sa capacité à tirer profit du bien collectif. La fonction de profit de l'agriculteur devient alors $\pi_i = h_i(\tilde{q}_i, q_i, x_i)$.

1.5 Un plan de travail

La question posée au début de ce chapitre consiste, de façon simplifiée, à comparer l'intérêt de règles créant des interactions avec le dommage causé par les équilibres de Nash qu'elles engendrent.

Parmi l'ensemble des règles possibles, une première question permet d'établir une ligne de démarcation : est-il coûteux pour le Gestionnaire de vérifier que les allocations qu'il a établies sont respectées ?

⁴Voir le chapitre 5 pour une présentation plus détaillée de cette approche, notamment autour du travail de Moulin.

Lorsque le coût de vérification du respect de l'allocation est faible

Il y a alors un arbitrage à faire entre l'efficacité *ex post* des règles et l'inefficacité due à la prise en compte de ces règles dans les choix d'assolement. **Cet arbitrage n'a de sens que si la population des agriculteurs est hétérogène** : dans le cas contraire, la règle *ex ante* de partage égal de l'eau entre tous les irrigants est la solution du programme (1.7). L'efficacité des règles *ex post* vient du fait qu'elles sont justement capables de répartir de façon efficace l'eau au niveau collectif, c'est-à-dire qu'elles permettent de bien tenir compte de l'hétérogénéité entre les agriculteurs. Deux caractéristiques sont souvent à l'origine de cette hétérogénéité : la capacité à valoriser la ressource et l'aversion au risque.

C'est pourquoi la question initiale est abordée selon les deux angles suivants :

- o le chapitre 2 traite du cas où la ressource qui sera collectivement disponible est connue et où les agriculteurs n'ont pas la même capacité à valoriser l'eau ;
- o le chapitre 3 traite du cas où la ressource collective est incertaine et où les agriculteurs diffèrent par leur aversion au risque.

Pour cet arbitrage, les associations d'usagers en Tunisie constituent le terrain d'application principal.

A cet arbitrage vient s'en ajouter un second, lorsque le coût de vérification du respect d'une allocation donnée est important.

Dans ce cas, la Collectivité peut choisir des allocations plus faciles à mesurer ou bien effectuer une mesure groupée pour un ensemble de points de prélèvement. Les agriculteurs peuvent alors avoir des comportements stratégiques pour augmenter individuellement la quantité d'eau qu'ils peuvent prélever. Il faut alors arbitrer entre différents niveaux d'acquisition de l'information, selon l'inefficacité des interactions stratégiques alors engendrées et selon le coût d'acquisition de cette information.

Le chapitre 4 traite de cet arbitrage ; le terrain d'application principal sera le bassin de l'Adour.

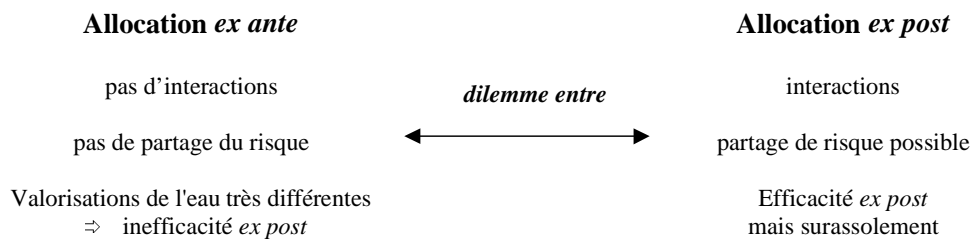
La figure (1.8) illustre les deux principaux arbitrages étudiés au cours des chapitres 2, 3 et 4.

Enfin, les chapitres 2 et 3 utilisent deux types de modèles :

- un **modèle théorique**, qui se veut générique et n'est précisé que de façon à pouvoir modéliser des règles de nature différente et l'existence d'une hétérogénéité dans la capacité à valoriser l'eau ou dans l'aversion au risque ;
- un **modèle appliqué**, qui permet une grille de lecture réaliste des périmètres étudiés. Le modèle se fonde sur un couplage entre un modèle de bilan hydrique qui permet de relier irrigations et rendement, et un modèle de choix d'assolement, par optimisation du profit sous contraintes techniques.

Le chapitre 4 ne met en œuvre qu'un modèle théorique de simulation d'un équilibre de Nash sur plusieurs périodes.

Faible coût de vérification du respect de l'allocation



Coût potentiellement important de vérification du respect de l'allocation

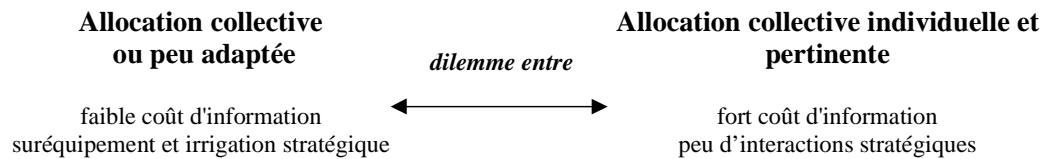


FIG. 1.8 – les deux principaux arbitrages étudiés

1.6 Approche formelle du problème dans le cas d'une méconnaissance des caractéristiques individuelles

Nous précisons ici la forme générale du modèle mathématique qui sera utilisé dans les chapitres suivants (2 et 3).

Nous étudions le cas fréquent où, pour atteindre une allocation efficace, le Gestionnaire doit connaître une caractéristique individuelle. Lorsqu'il peut connaître cette caractéristique à un coût faible, le Gestionnaire peut tout déterminer : les agriculteurs ne disposent pas alors de marge de manœuvre (fig. 1.9). On étudie ici le cas où, en revanche, **le coût d'acquisition de cette caractéristique est prohibitif**. On suppose alors que, ne connaissant pas cette caractéristique, le Gestionnaire renonce à tout déterminer et laisse une marge de manœuvre aux agriculteurs : on s'intéresse plus particulièrement au cas où les agriculteurs sont autonomes en ce qui concerne les surfaces mises en culture. La figure (1.9) schématise alors le dilemme en ce qui concerne le niveau d'interdépendance créée par la règle d'allocation.

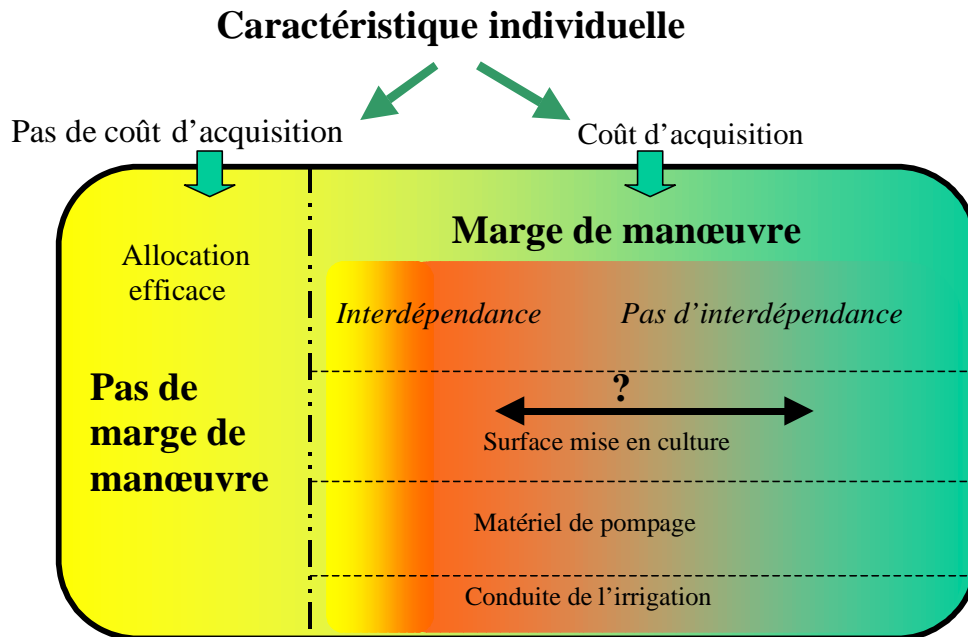


FIG. 1.9 – le choix d'un niveau d'interdépendance

Nous considérons un système irrigué composé de n agriculteurs, chacun pouvant choisir en début de campagne la surface qu'il va mettre en culture irriguée.

Il est nécessaire de spécifier la forme de la fonction de production pour pouvoir comparer des règles de nature très différentes : des règles classiques de gestion de ressource en bien commun (allocation *ex ante* ou *ex post*, mutualisation) aux mécanismes issus de l'économie de l'information, tels que les mécanismes de révélation.

Lorsque le stress hydrique n'est pas trop important, le rendement à l'hectare r d'une culture peut être exprimé en unité monétaire comme une fonction concave C^1 de l'eau apportée. Nous supposons aussi qu'il existe une quantité d'eau V_m telle que $(\forall V > V_m, r = r_m)$ mais cette hypothèse, si elle est réaliste, n'a pas d'impact sur la formulation

mathématique puisqu'il est toujours plus profitable de se placer sur la partie croissante de la courbe.

Nous supposons qu'un agriculteur peut choisir de mettre en culture irriguée une surface s_i limitée par la surface disponible s_m . Le fait qu'il puisse mettre par ailleurs une culture non irriguée de rendement indépendant des choix d'irrigation n'a pas d'importance.

Chaque agriculteur va obtenir une fraction V_i du volume collectif V et va la répartir uniformément sur la surface irriguée s_i qu'il a choisie, par concavité de la courbe de rendement⁵. Un coefficient a_i représente la capacité de l'agriculteur à valoriser l'eau : ce peut être la possibilité de faire différentes cultures ou bien une meilleure technicité. Le bénéfice que tire l'exploitant i vaut à l'hectare : $a_i r(\frac{V_i}{s_i})$.

Enfin, l'agriculteur va payer des charges pour ses cultures, charges que nous supposons proportionnelles à la surface irriguée. Ces charges ks_i sont normalisées de telle sorte que $r(0) = 0$.

Le revenu de l'agriculteur est alors :

$$\pi_i = s_i [a_i r(\frac{V_i}{s_i}) - k]$$

De plus, l'agriculteur va payer un montant t au Gestionnaire ou sur un marché. Ce montant représente souvent une taxe correspondant au coût de l'eau et alors est positif, mais il peut aussi représenter un échange monétaire effectué sur un marché et il peut alors être négatif.

Nous faisons enfin l'hypothèse que le choix de surface fait par un agriculteur n'influence les autres qu'à travers la surface totale $S = \sum s_i$ mise en culture sur le système irrigué. La règle collective est alors définie par un couple formé d'une fonction d'allocation de l'eau $V_i = f(i, s_i, S, V)$ telle que $V = \sum_{i \in I} f(i, s_i, S, V)$ et d'une fonction de taxation $t(i, s_i, S, V)$ telle que $\sum_{i \in I} t_i \geq 0$.

L'agriculteur a une fonction d'utilité cardinale de la forme $U_i(\pi_i(s_i, V_i))$. En univers incertain, il s'agira d'une fonction d'utilité de la forme von Neumann - Morgenstern. En univers certain, elle se résumera simplement au profit réalisé.

L'agriculteur résout alors :

$$\underset{s_i \leq s_m}{Max} \quad U_i(\pi_i) = U_i(s_i [a_i r(\frac{f(i, s_i, S, V)}{s_i}) - k] - t(i, s_i, S, V)) \quad (1.2)$$

Avant d'étudier la gestion collective de l'eau, nous examinons le cas d'un agriculteur seul dans ce cadre théorique.

1.6.1 Choix de surface irriguée pour un agriculteur seul

Ici, un agriculteur seul peut utiliser un volume V_i et paie alors un coût de production de l'eau wV_i . Le choix de la surface irriguée vient de la résolution du programme :

$$\underset{s_i \leq s_m}{Max} \quad \pi_i = s_i [a_i r(\frac{V_i}{s_i}) - k] - wV_i \quad (1.3)$$

⁵Par la suite, nous utilisons des lettres majuscules V pour indiquer un volume attribué sur toute la surface mise en culture et des lettres minuscules v lorsque le volume est donné à l'hectare.

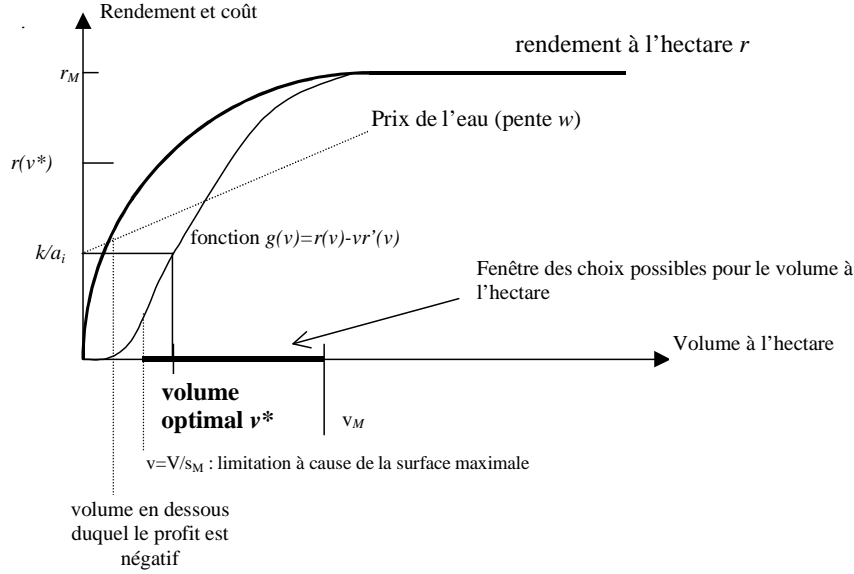


FIG. 1.10 – volume optimal par hectare pour un agriculteur seul

Puisque la fonction de production est concave, $\frac{\partial^2 \pi_i}{\partial s_i^2} = \frac{V_i}{s_i^2} r''\left(\frac{V_i}{s_i}\right) \leq 0$ et par conséquent le profit π est lui aussi une fonction concave en s_i . Ainsi, si μ est le multiplicateur de Lagrange associé à la contrainte du problème (1.3), le volume par hectare optimal v_i^* est défini par :

$$a_i r(v_i^*) - a_i v_i^* r'(v_i^*) - k - \mu = 0 \quad (1.4)$$

Soit $g(u) = r(u) - ur'(u)$; si la surface optimale s_i^* est plus petite que s_m , alors elle est donnée par $g(v_i^*) = \frac{k}{a_i}$. De plus, $g'(u) = -ur''(u) > 0$ donc g est inversible :

$$s_i^* = \min\left(s_m, \frac{V_i}{g^{-1}\left(\frac{k}{a_i}\right)}\right) \quad (1.5)$$

Ainsi, v_i^* a deux limites inférieures :

- celle due à la surface irrigable maximale s_m : $v_i^* \geq \frac{V_i}{s_m}$;
- et le fait que le profit doit être positif : $r(v_i) \geq \frac{k + wv_i}{a_i}$.

Si la solution est intérieure, le volume optimal par hectare est représenté sur la figure (1.10).

1.6.2 Le programme de la collectivité

Nous nous plaçons dans un contexte utilitariste : nous supposons que la fonction de bien-être social de la collectivité est de type Bergson-Samuelson $W(U_1(\pi_1), \dots, U_n(\pi_n))$ où π et U sont les profits et les utilités individuels.

Il s'agit ici de maximiser cette fonction d'utilité d'une Collectivité composée d'agents possédant une caractéristique inconnue du Principal (capacité à valoriser l'eau, aversion au risque) et autonomes dans leur choix de surface irriguée. Cependant, ce choix de surface peut être connu du Principal. Nous cherchons les mécanismes optimaux de répartition du bien privé *eau* dans ce contexte.

La fonction de bien-être sera maximisée sous la contrainte que les agriculteurs sont autonomes dans leur choix d'assolement. **Cette autonomie n'a d'impact que si les agriculteurs ont une caractéristique hétérogène (sinon l'allocation symétrique est suffisante) et si elle n'est pas (ou mal) connue de la Collectivité (sinon une tarification utilisant ce paramètre permettra de s'affranchir des interactions stratégiques).** Par la suite, ce paramètre d'hétérogénéité sera soit une capacité individuelle à valoriser l'eau, soit le degré d'aversion au risque.

Définition de l'équité

Le choix d'une fonction de bien-être social peut s'appuyer sur une notion d'équité. Quelle définition de l'équité choisir ici ? Nous considérons que l'équité se fonde sur une notion de justice partagée par les différents agents. En ce sens, une allocation peut effectuer des redistributions de revenus sans pour autant satisfaire un principe d'équité aux yeux des usagers.

La définition d'une allocation équitable dépend en fait du type d'hétérogénéité entre agriculteurs.

Nous traitons dans les chapitres suivants de trois types d'hétérogénéité.

- Au chapitre 2, les agriculteurs diffèrent par leur capacité à valoriser l'eau. Ce peut être une question de compétence personnelle ou des problèmes de fuite du réseau.
- Au chapitre 3, les agriculteurs diffèrent par leur aversion au risque.
- Au chapitre 4, nous envisageons le cas où les agriculteurs possèdent des sols de natures différentes.

L'équité peut alors être définie de deux façons différentes : l'égalité relativement à la quantité d'eau distribuée et l'égalité des revenus.

L'égalité relativement à la quantité d'eau distribuée

Cette définition est utilisée lorsque **les acteurs estiment que les différences entre agriculteurs ne doivent pas être prise en compte dans la distribution de l'eau.**

Par exemple, dans le bassin de l'Adour, les champs sont achetés et vendus à un prix qui tient compte de la qualité du sol. Selon le point de vue des agriculteurs, si des quotas devaient être mis en place, ils ne devraient donc pas prendre en compte cette caractéristique. De même, cette règle sera celle considérée comme équitable si les agriculteurs diffèrent par leurs caractéristiques personnelles, par exemple leur degré d'aversion au risque ou leur capacité technique à valoriser l'eau.

Si une allocation de l'eau prend en compte dans ce cas l'hétérogénéité des agriculteurs, elle devra, pour être considérée comme équitable, dédommager ceux qui auront reçu moins d'eau de façon à leur garantir un revenu inchangé.

L'égalité des revenus

Si la source d'hétérogénéité est indépendante des caractéristiques propres des agriculteurs, par exemple l'existence de fuites dans le réseau, une allocation équitable consistera à attribuer de l'eau (ou de l'argent) de façon que les revenus des agriculteurs soient égaux.

Par ailleurs, quel que soit le type d'hétérogénéité considéré et donc la définition de l'équité associée, la Collectivité peut aussi ne pas s'appuyer sur cette définition de

l'équité et choisir sa fonction de bien-être collectif de façon à effectuer une redistribution des revenus...ou à maximiser la valorisation totale de l'eau sur l'ensemble du système irrigué.

Dilemme équité-valorisation économique

Dans ce cadre théorique, on s'autorise des échanges monétaires entre agents. Il n'y aurait donc pas de dilemme équité-valorisation économique si nous étions en économie d'échange : une première étape consisterait à chercher la règle qui maximise le revenu collectif puis ce revenu serait redistribué de façon équitable entre les agriculteurs.

Ici, le contexte est celui d'une économie de production avec une liberté de manœuvre possédée par les agriculteurs. C'est **ce degré de liberté qui va créer, en absence de marché, un dilemme efficacité-équité** : les règles qui mettront en œuvre un partage du revenu inciteront les agriculteurs les plus compétents à moins investir.

De façon générale, le choix de la fonction de bien-être collectif correspond à effectuer un arbitrage entre l'efficacité et l'équité. Ray et Ueda (1996) proposent un critère de classification selon l'égalitarisme qui permet de définir un spectre avec aux deux extrêmes :

- d'une part une fonction utilitariste (Bentham) : $W = \sum U_i$, qui privilégie la valorisation totale ;
- d'autre part la fonction de Rawls $W = \min U_i$ qui représente le degré maximal d'égalitarisme, sans se préoccuper de la valorisation totale de l'eau.

A titre d'exemple, Ray et Ueda proposent la famille Atkinson qui est la norme L_p des utilités individuelles : $W = [\sum U_i^p]^{\frac{1}{p}}$, pour $p \in]-\infty, 1]$ avec $p \neq 0$ et, pour $p = 0$, $W = \prod U_i$. Dans ce cadre, pour $p = 1$, W correspond à la fonction utilitariste classique et, pour $p = -\infty$, W correspond à la fonction de Rawls.

Approche générale...

Le Principal va chercher les règles d'allocation de l'eau et de taxation qui permettent de maximiser cette fonction de bien-être collectif sous la contrainte que les agriculteurs sont autonomes dans leur choix de surface. Le programme du Principal est donc :

$$\begin{aligned} \underset{f,t}{Max} \quad & W \left\{ U_1, \dots, U_i \left[s_i \left[a_i r \left(\frac{f(i, s_i, S, V)}{s_i} \right) - k \right] - t(i, s_i, S, V), \dots U_n \right] \right\} \\ \text{s.c.} \quad & \begin{cases} \forall i \in \{1, n\} & s_i = \underset{s_i}{Arg \ Max} U_i \left[r_i \left(\frac{f(i, s_i, S, V)}{s_i} \right) - k \right] - t(i, s_i, S, V) \\ \sum_i f(i, s_i, S, V) = V \\ \sum_i t(i, s_i, S, V) \geq KT \end{cases} \end{aligned} \quad (1.6)$$

Dans le programme précédent, KT représente le coût de production de l'eau.

...et simplification adoptée

Le programme précédent est complet : il permet de chercher la meilleure règle d'allocation et de taxation en fonction d'un rapport pondéré entre valorisation et équité. Cependant, d'un point de vue purement technique, il est trop lourd à mettre en œuvre.

Nous nous limiterons donc à une fonction utilitariste $W = \sum U_i$ en univers certain et à des fonctions de la formes $W = \sum \lambda_i U_i$ en univers incertain. L'analyse de l'impact sur l'équité des différentes règles envisagées serait faite ensuite, dans un deuxième temps. Une justification possible est qu'il est important de chercher à valoriser l'eau au mieux collectivement, quitte à organiser des transferts monétaires pour assurer l'objectif d'équité (aide sociale, prêts pour les plus pauvres, etc.).

Le programme est donc le suivant :

$$\begin{aligned} \underset{f,t}{Max} \quad & \sum_{i=1,n} \left\{ U_i \left[s_i \left[a_i r \left(\frac{f(i, s_i, S, V)}{s_i} \right) - k \right] - t(i, s_i, S, V) \right] \right\} \\ \text{s.c.} \quad & \begin{cases} \forall i \in \{1, n\} & s_i = \underset{s_i}{Arg \ Max} \lambda_i U_i \left[r_i \left(\frac{f(i, s_i, S, V)}{s_i} \right) - k \right] - t(i, s_i, S, V) \\ \sum_i f(i, s_i, S, V) = V \\ \sum_i t(i, s_i, S, V) \geq KT \end{cases} \end{aligned} \quad (1.7)$$

1.7 Utiliser la théorie des jeux ?

Cette partie a pour objet de situer notre approche dans un champ théorique plus large, et d'explicitier autant que possible les différents paradigmes qui fondent la formalisation décrite précédemment.

Utilitarisme

Nous nous plaçons dans un cadre utilitariste. Les joueurs maximisent soit leur profit, soit l'espérance von Neumann Morgenstern (vNM) de leur profit.

L'importance de cette hypothèse dépend en fait du contexte d'application. Suivant les cas d'étude, les agriculteurs suivent plus ou moins (voire pas du tout) un raisonnement de type économique. Nos enquêtes sur le terrain nous ont permis d'estimer que sur l'Adour et en Tunisie, cette hypothèse pouvait être faite.

Un jeu

De plus, comme pour toute formalisation en terme de théorie des jeux, "les intérêts pré-existent à la relation, de même que les sujets sont définis indépendamment d'elle et préalablement à sa structuration" (Caillé, 1994). En effet, quels que soient les arguments de la fonction d'utilité des joueurs, il y aura toujours nécessairement, par l'abstraction faite dans le choix d'interagir de telle ou telle façon, un moment où la décision sera prise de façon intrinsèque par l'agent. Faut-il en déduire, comme l'estime Caillé, une incapacité fondamentale de la théorie des jeux à saisir l'interaction ? Bien sûr que non : la question n'est pas de savoir si la simplification de la théorie des jeux est fondamentalement juste ou non, mais plutôt de savoir dans quels domaines, dans quelles situations cette simplification est valable ou non.

Si cette restriction peut être d'importance pour des jeux où le nombre de joueurs est faible, elle n'affecte pas notre formalisation puisque nous considérons les résultats de l'interaction pour une règle donnée, acceptée par tous (i.e. peu de valeur morale à s'autolimiter dans l'investissement) et avec un grand nombre de joueurs (le sens donné par un joueur à la relation qu'il a avec les autres perd de son ampleur).

Des choix de surface simultanés ?

Les joueurs choisissent ici la surface mise en culture en fonction d'une hypothèse sur la surface totale qui sera mise en culture. Cette hypothèse est avant tout fondée sur l'expérience des années passées. On pourrait néanmoins considérer que les agriculteurs choisissent leur surface de façon séquentielle, par exemple d'amont en aval dans le cadre certain du chapitre 2 ou du moins averse au plus averse au risque dans le cadre incertain du chapitre 3. La formalisation d'un tel choix séquentiel serait cependant très lourde.

Solution du jeu et équilibre de Nash

Nous allons calculer, pour chaque règle créant une interdépendance, l'équilibre de Nash associé à chaque règle d'allocation et de taxation.

Cet équilibre existe et il est unique dans notre contexte. Dans le chapitre 2, nous montrons qu'à n'importe quelle règle est associé un unique équilibre de Nash. Au chapitre 3, nous nous contentons de construire, règle par règle, l'équilibre de Nash associé.

De façon qualitative, l'existence et l'unicité de l'équilibre de Nash reposent sur les principes suivants. Puisqu'il y a de nombreux joueurs, on peut considérer que chaque joueur a une fonction de réaction de la forme $s'_i = f_i(S)$, où S est la surface totale mise en culture sur l'ensemble du périmètre. Cette fonction de réaction est décroissante, donc, au total, $S' = \sum_i s'_i = F(S)$ est décroissant (fig. 1.11) : l'équilibre est unique. Il suffira ensuite de se placer dans un espace de topologie compacte pour s'assurer de l'existence du point fixe.

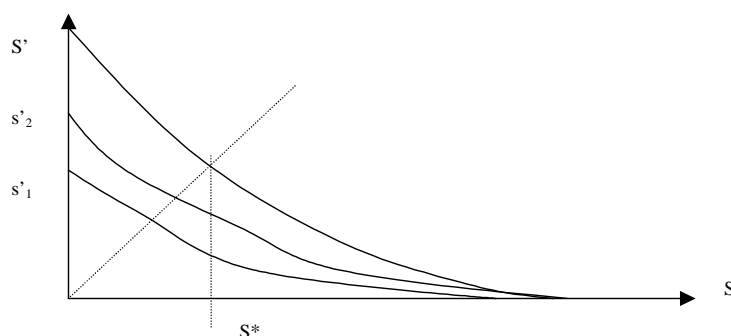


FIG. 1.11 – fonctions de réaction

Par ailleurs, cet équilibre est un équilibre en stratégie pure. Nous évitons ainsi tous les questionnements difficiles d'interprétation des stratégies mixtes. De plus, puisque nous sommes à n joueurs, nous estimons que l'élargissement de l'espace des stratégies en un métajeu ou avec des stratégies de menaces (Schmidt, 2001) n'apporte rien d'intéressant. Quant à justifier comment l'équilibre de Nash est atteint, nous pensons être dans une situation où l'explication de la convergence progressive vers l'équilibre de Nash, par essais et erreurs, est suffisante.

Chapitre 2

Répartir l'eau entre des agriculteurs qui la valorisent différemment

“Je regarde autour de moi : si les gens ne font pas de pastèque, j'en fais trois hectares.”

Un agriculteur dans le Kairouanais

Résumé du chapitre

Lorsque la ressource à partager est connue à l'avance, le seul paramètre rendant la définition d'une allocation problématique pour valoriser l'eau au mieux est l'existence d'une hétérogénéité au sein des irrigants, dans leurs capacités à valoriser l'eau. Cette hétérogénéité peut provenir d'une différence de compétence, de qualité de sols ou de l'existence de pertes sur le réseau. Si le Gestionnaire cherche à valoriser l'eau au mieux, il peut obtenir la valorisation optimale s'il connaît la distribution des capacités individuelles, en utilisant soit un mécanisme de révélation soit une taxe fondée sur ce mécanisme. En revanche, lorsqu'il n'a aucune information sur ces capacités, il est obligé d'utiliser des règles n'y faisant pas référence, telles que les allocations *ex ante* et *ex post*.

Dans ce cadre, différentes règles sont caractérisées et comparées en fonction de leur capacité à valoriser l'eau sur l'ensemble du périmètre. Suivant le degré d'hétérogénéité du groupe d'agriculteurs, la meilleure valorisation provient d'une règle de type *ex ante* ou *ex post*.

Une application est faite sur un petit périmètre irrigué en Tunisie, où la règle d'allocation consiste à laisser chaque agriculteur irriguer autant de temps qu'il souhaite lorsqu'il a la main d'eau. La modélisation de l'équilibre de Nash associé à cette règle permet de retrouver l'assolement choisi par les agriculteurs. Une allocation de type *ex ante* ou une de type *ex post* mais avec un contrôle de la durée du tour d'eau permettent toutes les deux une nette amélioration de la valorisation de l'eau sur ce périmètre.

L'étude porte, dans ce chapitre, sur les systèmes irrigués où le volume collectif qui sera à partager pendant la saison d'irrigation est connu par les agriculteurs lorsqu'ils font leurs choix de cultures. C'est le cas lorsque le système irrigué utilise l'eau pompée dans

un aquifère, comme pour les petits périmètres irrigués étudiés en Tunisie. Lorsque le système irrigué utilise l'eau d'une retenue, le volume total qui sera disponible peut être plus ou moins déterminé par le volume déjà présent dans la retenue au moment des choix d'assolement. On peut considérer que le niveau de remplissage en début de campagne des barrages gérés par la CACG et des petits lacs collinaires gérés par les ASA permet d'avoir une bonne estimation du futur volume disponible.

Dans ce contexte, il n'est donc pas question de risque, les deux objectifs que la Collectivité pourra chercher à atteindre sont donc la valorisation de l'eau et l'équité.

Si les agriculteurs ont tous la même capacité à valoriser l'eau, la règle *ex ante* donne l'allocation optimale au regard des objectifs d'équité et de valorisation de l'eau. En revanche, lorsque les agriculteurs n'ont pas la même capacité à valoriser l'eau, il y a un arbitrage à faire entre ces deux objectifs.

Cette hétérogénéité dans la capacité à valoriser l'eau est la règle plus que l'exception dans les systèmes irrigués. Les deux facteurs les plus importants sont l'existence de plusieurs assolements au sein d'un même système d'une part et d'autre part l'existence de pertes le long du réseau d'amenée d'eau au sein d'un périmètre irrigué.

Dans la suite de ce chapitre, le dilemme entre équité et valorisation de l'eau ne sera pas directement étudié. Différentes règles d'allocation seront caractérisées selon leur capacité à valoriser l'eau sur l'ensemble du périmètre irrigué. Ensuite elles ne seront étudiées vis-à-vis de l'objectif d'équité que dans le cadre d'une application numérique. Comme nous l'avons vu au chapitre précédent, l'allocation qui sera probablement considérée comme équitable par les agriculteurs eux-mêmes dépend de la nature de l'hétérogénéité. Lorsque l'hétérogénéité porte sur les compétences, l'allocation la plus équitable est l'allocation la plus égalitaire, i.e. une allocation *ex ante*. En revanche, lorsque l'hétérogénéité porte sur des caractéristiques indépendantes de l'agriculteur telles que les pertes sur le réseau, l'équité consiste à égaliser les revenus : la question de la meilleure règle d'allocation avec cette définition de l'équité n'est pas triviale..., mais elle ne sera pas abordée ici.

Question du chapitre

Lorsque les agriculteurs n'ont pas la même capacité à valoriser la ressource, quelles règles permettent de bien valoriser l'eau sur l'ensemble du périmètre ?

Selon le type d'information possédé par le Gestionnaire sur ces capacités individuelles, les situations sont très différentes.

Lorsque le Gestionnaire connaît la capacité de chaque individu, il peut construire l'allocation qui valorise le mieux l'eau.

Lorsqu'il connaît la distribution de ces capacités sur le système irrigué, il peut bâtir un mécanisme de révélation* ou la taxe associée à ce mécanisme de façon, là aussi, à atteindre l'optimum de valorisation. Cependant, il s'agit alors de systèmes complexes qui peuvent être difficilement acceptés par les usagers, et c'est pourquoi, même s'il

connaît la distribution sur les capacités, le Gestionnaire pourra préférer des règles plus simples, de type *ex ante* ou *ex post*.

Enfin, lorsqu'il n'a aucune connaissance sur ces paramètres, la seule solution pour atteindre l'optimum de valorisation est un marché, mais nous avons vu dans le chapitre préliminaire pourquoi celui-ci était rarement utilisé. En absence de marché, il n'est plus possible d'atteindre l'optimum : il faut faire une analyse de second rang. Dans cette situation, les règles utilisées dans de nombreux systèmes irrigués, *ex ante* et *ex post*, peuvent être utilisées car elles ne prennent pas en compte les capacités individuelles dans la construction des allocations.

Représentation de l'hétérogénéité

Soit a_i le coefficient individuel qui représente la capacité à valoriser l'eau : la capacité à faire des cultures à différentes valeurs ajoutées ou bien un niveau de technicité de l'agriculteur (c.f. le chapitre 1 p. 67). Ce coefficient va modifier la fonction de rendement d'un agriculteur r , à volume d'eau reçu par hectare donné $\frac{V_i}{s_i}$. La fonction de production à l'hectare s'écrit alors ici $a_i r(\frac{V_i}{s_i})$.

Les résultats qui vont être présentés dans ce chapitre pourraient être réécrits facilement avec une production de la forme $r(\frac{a_i V_i}{s_i})$ qui, elle, pourrait représenter une hétérogénéité dans les caractéristiques du sol ou encore les pertes sur le réseau. La partie qualitative des propositions suivantes serait en tout cas conservée.

De plus, on suppose que $(a_i)_{i \in I}$ est strictement décroissant sur le groupe $I = (1..n)$ d'agriculteurs.

Enfin, nous distinguerons par la suite le *profit* d'un agriculteur π_i , qui prend en compte les taxes, et la *valorisation de l'eau* W_i , qui n'en tient pas compte.

La revue de littérature faite au chapitre 1 était fondée sur la question de l'impact de l'hétérogénéité sur l'efficacité de la gestion collective, i.e. dans le cas présent la valorisation totale de l'eau sur le périmètre. Nous ne cherchons pas ici à répondre à cette question : de toute façon, le formalisme adopté pour représenter l'hétérogénéité ne permet pas de prendre en compte facilement une augmentation générale de l'hétérogénéité, à valeur moyenne donnée. La question posée ici est celle de la règle d'allocation à choisir à niveau d'hétérogénéité donné, avec éventuellement une normalisation du résultat pour une règle donnée par le résultat de l'allocation optimale pour ce niveau d'hétérogénéité.

Quelques études ont déjà effectué une comparaison entre différentes allocations dans le cadre d'un système irrigué connaissant des pertes sur le réseau.

Small et Rimal (1996) ont simulé différentes règles d'allocation sur un périmètre irrigué produisant du riz en Asie, avec des pertes sur le réseau. Ils déterminent la règle qui consiste à répartir l'eau de façon à minimiser les pertes sur le réseau, i.e. à donner l'eau en priorité aux blocs en amont. Compte-tenu de la forte sensibilité du riz à la pénurie d'eau, cette règle donne des résultats en termes d'efficacité économique et d'équité très proches de la règle qui maximise l'efficacité économique. Par ailleurs, plus la pénurie est importante, plus les objectifs d'équité et d'efficacité économique deviennent antinomiques. Une autre règle consiste à répartir la pénurie de façon égale entre chaque bloc au niveau de l'entrée du périmètre, c'est-à-dire qu'*in fine*, les blocs en amont reçoivent tout de même plus d'eau que les blocs en aval. Small et Rimal estiment que cette règle constitue un bon compromis entre équité et efficacité économique. Cependant, ce modèle ignore la réaction des irrigants face à une règle d'allocation.

Cette réaction est en revanche prise en compte dans le modèle de Ray et Williams (1999). Leur modèle simule les choix d'assolements d'agriculteurs le long d'un *watercourse*, canal tertiaire des grands périmètres irrigués en Inde et au Pakistan. Ray et Williams modélisent l'existence de pertes le long du canal et simulent 9 scénarios, fondés sur trois politiques de prix possibles (prix réels de vente pour les cultures et pour l'eau, prix réel pour l'eau et subvention aux cultures ou bien subvention pour les deux) et trois modes d'allocation de l'eau possibles (maximisation de la valorisation totale de l'eau, égalitaire et existence de vols d'eau). L'existence de vols d'eau conduit à une allocation aussi inéquitable que celle qui valorise le mieux l'eau et de plus l'allocation avec vols valorise l'eau moins bien que l'allocation égalitaire. De plus l'allocation avec vols engendre des rentes dont il faudra évidemment tenir compte si on veut réformer le système d'allocation. Cependant, le modèle de Ray et Williams ne simule pas de règles d'allocation susceptibles de créer des interactions entre des agents autonomes dans leur choix d'assolement.

Le chapitre est organisé de la façon suivante.

Le **modèle théorique** présenté au chapitre 1 est utilisé ici : la section 1 détermine d'abord, dans le cadre de l'approche formelle présentée au chapitre 1, l'allocation optimale lorsque le Gestionnaire connaît les capacités individuelles à valoriser l'eau. Puis, dans la section 2, le problème général lorsqu'il n'a plus cette information est défini : d'abord lorsque le Gestionnaire connaît la distribution sur le système irrigué, puis lorsqu'il ne dispose d'aucune information. Ensuite, différentes règles d'allocation existantes ou envisageables sont déterminées puis comparées en fonction du degré d'hétérogénéité du groupe.

Enfin, la dernière section est consacrée à l'étude de cas sur le périmètre irrigué El Melalsa. Un **modèle appliqué** à ce cas est mis en œuvre : la règle actuelle de gestion de l'eau est modélisée comme un équilibre de Nash sur les choix d'assolement. D'autres règles envisageables pour ce périmètre irrigué sont aussi déterminées.

2.1 L'allocation optimale

Nous supposons que le Gestionnaire connaît les coefficients individuels et peut imposer les surfaces mises en culture et le volume alloué à chaque agriculteur. Le coût unitaire de production de l'eau est ici de w , comme pour la section traitant d'un agriculteur seul. Alors, l'optimum collectif est donné par :

$$\begin{aligned} \underset{(s_i, V_i)_{i \in I}}{\text{Max}} \quad & \sum s_i \left(a_i r \left(\frac{V_i}{s_i} \right) - k \right) - w V_i \\ \text{s.c.} \quad & \sum V_i = V \text{ et } \forall i \in I \quad s_i \leq s_m \end{aligned} \quad (2.1)$$

Proposition 1 *Quand le Gestionnaire connaît les capacités individuelles à valoriser l'eau et peut imposer les surfaces mises en culture et le volume alloué à chaque agriculteur, il peut faire la distinction entre deux groupes d'agriculteurs pour atteindre la valorisation maximale.*

◦ De l'agriculteur 1 à l'agriculteur q défini par $a_q g((r')^{-1}(\frac{\lambda(q)}{a_q})) = k$, toute la surface irrigable est mise en culture et chaque agriculteur reçoit $v_i^* = r'^{-1}(\frac{\lambda}{a_i})$ avec λ défini par

$V = s_m \sum_{i=1}^q (r')^{-1}(\frac{\lambda}{a_i})$. Si on pose $a_{-i} = (a_j)_{j \in I \setminus i}$, la fonction correspondante est donc :

$$f_{opt}(a_i, a_{-i}, V) = s_i r'(r'^{-1}(\frac{\lambda}{a_i}))$$

◦ De l'agriculteur $q + 1$ à n , aucune surface n'est mise en culture.

La valorisation totale est :

$$W_{opt} = s_m \sum_{i=1}^q \left[a_i r'((r')^{-1}(\frac{\lambda}{a_i}) - k) \right] \quad (2.2)$$

La démonstration est faite en annexe 2-1 du chapitre. Dans la suite de ce chapitre, pour alléger l'écriture, on entendra par "allocation optimale" cette allocation qui permet de valoriser l'eau de façon optimale.

Sur quelques rares systèmes irrigués, il existe des règles d'allocation qui attribuent l'eau en fonction des différentes valorisations potentielles de l'eau. Ainsi, en Colombie, les réseaux d'irrigation de Coello et Saldaña sont gérés depuis 1976 par des associations d'irrigants. Le tour d'eau est déterminé en fonction d'allocations fondées sur le type de culture et sur la surface semée. En début de chaque campagne, chaque usager a la responsabilité d'aller au siège de l'association pour signer son accord pour le tour d'eau (Vermillon et Garcés-Restrepo, 1996).

Chakravorty et Roumasset (1991) se placent dans le cas d'un réseau connaissant des pertes, avec des agriculteurs cultivant une surface irriguée constante. Ils montrent qu'alors l'allocation optimale de l'eau consiste, depuis la source et en s'en éloignant, à d'abord augmenter la quantité d'eau allouée, en raison de la convexité de la fonction de production. Lorsque l'élasticité du produit marginal de l'eau atteint 1, l'allocation optimale diminue ensuite avec la distance à la source. Selon le degré d'égalité voulu entre amont et aval, on pourra ensuite choisir entre plusieurs types de tarification : une tarification au coût marginal, une tarification proportionnelle aux bénéfices, une tarification qui égalise les charges ou encore qui égalise les bénéfices ; les auteurs pensent que l'avant-dernière solution réalise le meilleur compromis entre équité et efficacité.

2.2 Lorsque le Gestionnaire ne connaît pas les capacités individuelles à valoriser l'eau

En pratique, dans la plupart des cas, le Principal ne connaît pas les valeurs des coefficients a_i . Par la suite, deux cas sont considérés.

- Soit le Gestionnaire connaît la distribution générale des capacités individuelles a_i . Par exemple, il aura effectué par sondage une typologie qu'il estime pouvoir ensuite étendre à l'ensemble de la population. Autre possibilité : la procédure d'allocation s'est répétée déjà un certain nombre d'années, ce qui permet au Gestionnaire de faire une estimation.

- Soit le Gestionnaire n'a aucune information sur les compétences. C'est par exemple le cas si la capacité individuelle rend compte des compétences, qui peuvent changer au cours du temps. On cherche alors les fonctions d'allocation et de taxation de la forme $(f, t)(s_i, S, V)$ qui permettent la meilleure valorisation totale de l'eau.

2.2.1 Lorsque le Gestionnaire connaît la distribution sur les capacités individuelles

On suppose que le Gestionnaire connaît la distribution des compétences individuelles $(a_i)_{i \in I}$, c'est-à-dire qu'il sait devoir répartir l'eau entre n individus ayant ces caractéristiques, même s'il n'est pas capable d'associer à chaque agriculteur du système irrigué une capacité individuelle donnée a_i .

Son programme est alors :

$$\begin{aligned} \text{Max}_{f,t} \quad & \sum_i s_i [a_i r(\frac{f(s_i, S, V)}{s_i}) - k] - t(s_i, S, V) \\ \text{tel que} \quad & \begin{cases} \forall i \in \{1, n\} & s_i = \text{Arg Max}_{s_i} [a_i r(\frac{f(s_i, S, V)}{s_i}) - k] - t(s_i, S, V) \\ & \sum_i f(s_i, S, V) = V \\ & \sum_i t(s_i, S, V) \geq 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (2.3)$$

Il est possible de concevoir un mécanisme de révélation pour atteindre l'optimum de premier rang. D'abord, le Gestionnaire annonce les fonctions d'allocation et de taxation qui seront utilisées. Ensuite, chaque agriculteur envoie un message dans lequel il indique la capacité individuelle à valoriser l'eau a_i qu'il souhaite annoncer. Enfin, le Gestionnaire calcule le volume alloué et la taxe à payer, en fonction de l'annonce de chacun et de la distribution totale des annonces.

Soit $h(u)$ la fonction de densité des coefficients $(a_i)_{i \in I}$, supposée connue du Gestionnaire.

Proposition 2 *Il est possible de mettre en place un mécanisme de révélation qui atteint l'optimum de valorisation.*

◦ La fonction d'allocation est celle correspondant à l'allocation optimale :

$$f_r(a_i, s_i, S, V) = s_i (r')^{-1}(\frac{\lambda}{a_i}) = f_{opt}(a_i, a_{-i}, V)$$

◦ La fonction de taxation est :

$$t_r(a_i, s_i, S, V) = s_i \left(a_i r \left((r')^{-1}(\frac{\lambda}{a_i}) \right) - \int_{a_q}^{a_i} r((r')^{-1}(\frac{\lambda}{u})) h(u) du \right)$$

Le multiplicateur de Lagrange λ est celui associé à l'allocation optimale :

$$V = \sum_{i=1}^q s_i (r')^{-1}(\frac{\lambda}{a_i}) \quad (2.4)$$

où q est l'agriculteur pivot pour l'allocation optimale.

Le profit individuel vaut alors : $\pi(a_i) = s_i \int_{a_q}^{a_i} r((r')^{-1}(\frac{\lambda}{u})) h(u) du$.

La démonstration est faite en annexe 2-3.

La figure (2.1) représente l'ensemble des contrats possibles, qui comprennent l'origine et la courbe C dessinée dans le plan $(s = s_m)$: C est le lieu des points $(V(a_i), t(a_i))$ lorsque i décrit I avec $s = s_m$.

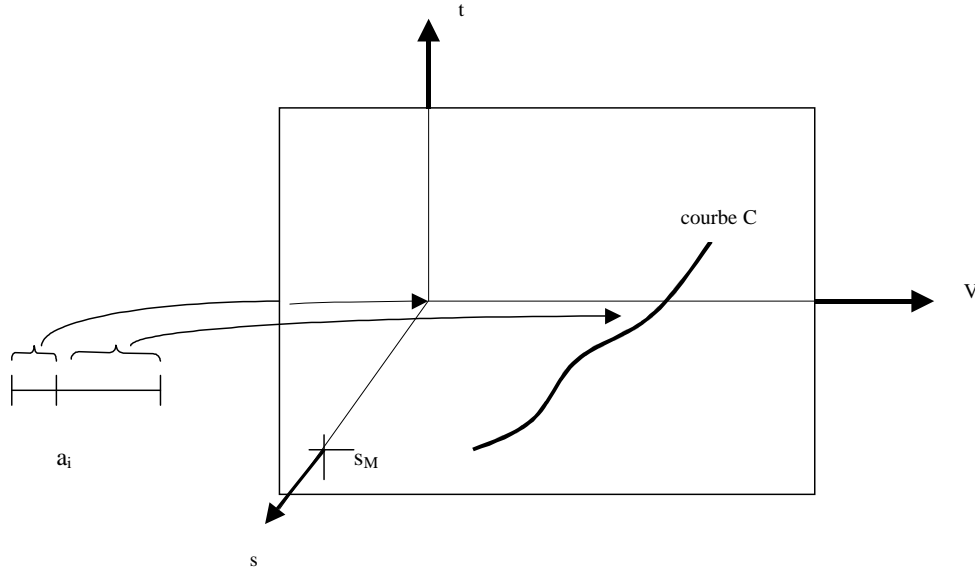


FIG. 2.1 – lieu des allocations avec l'allocation optimale et le mécanisme de révélation

En général, en théorie des contrats, un mécanisme de révélation ne permet pas d'atteindre l'optimum parce que pour inciter les “bons” agents à révéler leur type, il faut leur donner une rente nuisible à la collectivité. Ici, la situation est telle qu'il est à la fois intéressant pour les “bons” agriculteurs et pour la Collectivité que ces derniers révèlent leur type.

Peut-on, à partir du principe de taxation, définir une taxe qui soit équivalente au mécanisme de révélation, i.e. conduire à l'allocation optimale ?

Le principe de taxation pose que dans certaines conditions, toute allocation qui peut être atteinte par un mécanisme de révélation peut l'être par une taxe, et réciproquement (Guesnerie, 1995).

L'annexe 2-4 donne une esquisse de la démonstration de ce principe.

Dans le cas étudié, un couple d'allocation-taxation qui ne serait défini qu'en fonction de la surface mise en culture, soit $t(s_i), V(s_i)$, serait insuffisant pour décrire le lieu des allocations, puisque la population des agriculteurs se partage en $s_i = 0$ et $s_i = s_m$: il ne serait pas possible de distinguer le volume à attribuer entre différents agriculteurs ayant choisi de mettre toute leur surface en culture irriguée. Il faut donc ici laisser les agriculteurs choisir à la fois leur surface s_i et leur volume V_i , puis taxer à partir d'une fonction de taxation $t(s, V)$ construite à partir du mécanisme de révélation.

Proposition 3 *Il est possible de construire une fonction de taxation $t(s, V)$ qui permette d'atteindre le maximum de valorisation. La fonction de taxation est définie de la façon suivante :*

- $t(0, 0) = 0$;
- $\forall (s_i, V_i) \in C, \exists ! a_i; V_i = s_i(r')^{-1}(\frac{\lambda}{a_i}) = f_{opt}(a_i, a_{-i}, V)$ où λ est le multiplicateur calculé pour l'allocation optimale ; alors $t(s, V) = t_r(a_i)$;
- $\forall (s_i, V_i) \in \mathbb{R} \setminus \{C \cup (0, 0)\}, t(s_i, V_i) = M$ où M est une valeur dissuasive quelconque.

Notons que puisque le Gestionnaire connaît la distribution des $(a_i)_{i \in I}$, il peut effectivement calculer le multiplicateur λ tel que défini par l'équation (2.4).

Cette proposition constitue une simple application du principe de taxation : puisque le mécanisme de révélation ci-dessus permet d'atteindre l'allocation optimale, il est efficace et les conditions du principe sont vérifiées (voir annexe 2-4). En pratique, évidemment, des "amendes" dissuasives seraient très mal acceptées : on pourra simplement **remplacer ce système de taxation par un menu de contrats** (V, s, t) **qui décrira la courbe C.**

2.2.2 Lorsque le Gestionnaire n'a aucune information sur les capacités individuelles

Ici, le Gestionnaire doit rechercher des fonctions d'allocation et de taxation qui permettent d'atteindre l'optimum pour toute distribution des a_i .

Le programme est alors :

$$\begin{aligned} \underset{f,t}{Max} \quad & \sum_i s_i [a_i r(\frac{f(s_i, S, V)}{s_i}) - k] - t(s_i, S, V) \\ \text{tel que} \quad & \left\{ \begin{array}{l} \forall i \in \{1, n\} \quad s_i = \underset{s_i}{Arg \ Max} [a_i r(\frac{f(s_i, S, V)}{s_i}) - k] - t(s_i, S, V) \\ \sum_i f(s_i, S, V) = V \\ \sum_i t(s_i, S, V) \geq 0 \\ \forall (a_i) \in R_+^n \end{array} \right. \end{aligned} \quad (2.5)$$

On va montrer que, dans un espace restreint de fonctions, un tel programme n'a pas de solution.

Dans l'ensemble des fonctions (f, t) continûment dérivables de $(R^+)^3$ dans R , on définit un sous-ensemble convexe $L' \subset (C^1((R^+)^3 \rightarrow R))^2$ par :

◦ f est concave en s , décroissante en S , $\frac{\partial f^2}{\partial s \partial S} \leq 0$ et le volume par hectare $\frac{f}{s}$ est décroissant en s ;

◦ t est convexe en s et $\frac{\partial^2 t}{\partial s \partial S} \geq 0$.

Ces conditions sont assez naturelles, avec pour les dérivées croisées la lecture suivante : le volume marginal alloué pour une surface s diminue avec la surface totale S et la taxe marginale payée pour une surface s augmente avec cette même surface totale.

Proposition 4 *Il n'existe pas de paires de fonctions d'allocation et de taxation qui appartiennent à l'ensemble L' et qui vérifient le programme (2.5).*

La démonstration est faite en annexe 2-2.

Un marché permet évidemment d'atteindre l'optimum, mais il est de nature très différente des fonctions étudiées ici.

Proposition 5 *Le marché permet d'atteindre l'optimum de valorisation de l'eau.*

La démonstration est faite aussi en annexe 2-2.

Si on écarte la possibilité d'un marché, pour les raisons évoquées au chapitre préliminaire, il faut donc, en absence d'informations sur les caractéristiques individuelles, chercher à bâtir des fonctions dans un raisonnement de second rang.

Outre les règles communément utilisées *ex ante* et *ex post* associées à une taxe linéaire sur le volume, deux autres mécanismes potentiellement intéressants vont être caractérisés :

- une allocation mixte entre les allocations *ex ante* et *ex post* ;
- une allocation *ex post* couplée à un partage des revenus pour décourager le surinvestissement.

2.2.3 Allocation *ex ante*

Ici, chaque agriculteur sait avant le début de la campagne d'irrigation qu'il obtiendra une part donnée du volume collectif, par exemple $\frac{V}{n}$, et qui n'est pas liée à sa capacité individuelle à valoriser l'eau. Par conséquent, chaque agriculteur effectue ses choix de mise en culture en maximisant :

$$\pi_i = s_i \left[a_i r \left(\frac{V}{n \cdot s_i} \right) - k \right] - w \frac{V}{n}$$

et on a $v_i = \frac{V}{n s_i} = g^{-1} \left(\frac{k}{a_i} \right)$. L'agriculteur ne prend pas alors en compte les choix des autres irrigants dans son propre choix.

La fonction g^{-1} est croissante donc v_i est décroissant en a_i et croissant en i : **les agriculteurs moins compétents apportent plus d'eau à l'hectare et par conséquent mettent en culture une surface moins importante. Les valorisations marginales de l'eau sont différentes : il y a un potentiel de réallocation.**

De plus, $s_i = \frac{V}{n g^{-1} \left(\frac{k}{a_i} \right)}$ d'où $S = \frac{V}{n} \sum \frac{1}{g^{-1} \left(\frac{k}{a_i} \right)}$.

La valorisation collective de l'eau est déterminée par :

$$W_{exante} = \frac{V}{n} \sum \frac{a_i \cdot r \left(g^{-1} \left(\frac{k}{a_i} \right) \right) - k}{g^{-1} \left(\frac{k}{a_i} \right)} \quad (2.6)$$

Ce n'est que lorsque tous les agriculteurs sont identiques que l'allocation *ex ante* permet d'atteindre l'optimum de valorisation de l'eau.

Tardieu (1999) définit une valeur stratégique de l'eau comme le gain réalisé entre une culture irriguée et une culture en sec, divisé par le volume utilisé. Il définit de même une valeur tactique, qui est la variation de produit brut que permet une augmentation de la quantité d'eau apportée. Si les agriculteurs diffèrent peu dans leur capacité à valoriser l'eau, l'allocation *ex ante* peut être mise en place avec une tarification par paliers croissants avec :

- un quota tarifé à un prix moyen inférieur à la valeur stratégique de l'eau ;
- un prix de dépassement du quota supérieur à la valeur tactique de l'eau.

2.2.4 Allocation *ex post* sans mutualisation du profit

Chaque agriculteur va recevoir un volume proportionnel à la surface irriguée $V_i = \frac{s_i V}{\sum s_i}$ et va payer une taxe correspondant à un prix de l'eau w par unité de volume. Le profit individuel est alors :

$$\pi_i = s_i \left(a_i r \left(\frac{V}{S} \right) - k - w \frac{V}{S} \right) \quad (2.7)$$

Il y a interdépendance entre les agriculteurs et, de plus, le volume à l'hectare sera le même pour tous les agriculteurs : $v^* = \frac{V}{S}$. Alors, les agriculteurs qui peuvent obtenir

un profit positif, c'est-à-dire pour lesquels $a_j > \frac{k+w}{r(v^*)}$, mettront en culture toute leur surface cultivable. En revanche, ceux qui ne pourraient rembourser leurs coûts fixes du fait de leur mauvaise valorisation de l'eau, i.e. ceux pour lesquels $a_i < \frac{k+w}{r(v^*)}$, ne mettront rien en culture.

Proposition 6 *Avec la règle d'allocation ex post sans partage des revenus, les agriculteurs les plus compétents mettent toute leur surface en culture, jusqu'à l'agriculteur pivot $p(w)$ défini par $a_{p(w)}r(\frac{V}{ps_m}) = k$, tandis que les autres agriculteurs ne mettent rien en culture.*

Il y a un surasselement relativement à l'allocation optimale tant que le prix de l'eau $w < w^ = v_q a_q r'(v_q)$, où v_q est le volume à l'hectare reçu par l'agriculteur pivot q dans le cadre de l'allocation optimale.*

La valorisation totale est :

$$W_{expost} = s_m \sum_1^{p(w)} \left[a_i r\left(\frac{V}{p(w).s_m}\right) - k \right] = s_m k \sum_1^{p(w)} \left(\frac{a_i}{a_{p(w)}} - 1 \right) \quad (2.8)$$

Avec cette règle, le prix \hat{w} qui permet la meilleure valorisation collective est défini par :

$$a_{\hat{p}} r\left(\frac{V}{\hat{p}s_m}\right) - k - \frac{V}{\hat{p}^2 s_m} r'\left(\frac{V}{\hat{p}s_m}\right) \sum \hat{p} a_i = 0 \text{ avec } a_{\hat{p}} r\left(\frac{V}{\hat{p}s_m}\right) = k \quad (2.9)$$

La démonstration est faite en annexe 2-5.

Un prix élevé de l'eau conduit à un mécanisme de révélation indirecte sur les compétences des agriculteurs. Néanmoins, puisque l'argent perçu doit être ensuite redistribué entre les agriculteurs, cette allocation serait fondée sur des transferts importants d'argent et courrait le risque que le Gestionnaire "prenne l'argent et s'enfuit" (McAfee et Mc Millan, 1991).

Dayton-Johnson (2000a) montre de même qu'avec une répartition à la personne des coûts et une allocation de l'eau proportionnelle à la surface possédée, il n'y a qu'un nombre restreint d'agriculteurs qui participeront au système.

Dans la plupart des périmètres irrigués de la région de Kairouan, des règles de priorité entre les cultures sont utilisées : elles peuvent être classées comme des règles de type *ex post*. Ainsi, au printemps, à Bled Abida comme à El Melalsa, les cultures maraîchères sont prioritaires sur les cultures d'hiver telles que le blé. De plus, le melon peut supporter 15 jours sans irrigation tandis que la pastèque ne peut attendre plus d'une semaine. C'est pourquoi, à El Melalsa, les agriculteurs qui ont semé de la pastèque peuvent s'insérer dans le tour d'eau, mais pendant la nuit uniquement.

Enfin, dans le système Pasten utilisé en Indonésie, les gestionnaires calculent les besoins en eau de chaque bloc tertiaire, puis, en tenant compte des pertes, répartissent de façon proportionnelle la pénurie en eau (Howe, 1990). Ainsi, chaque agriculteur reçoit pour la même culture la même quantité d'eau à l'hectare, quelles que soient les pertes sur le réseau jusqu'à son bloc.

2.2.5 Allocation mixte entre *ex ante* et *ex post*

Puisque les règles *ex ante* et *ex post* sont plus ou moins efficaces selon le degré d'hétérogénéité du groupe, il peut être intéressant de construire une allocation mixte entre les deux. Cette allocation a la forme suivante :

$$f = \beta \frac{V}{n} + \frac{(1 - \beta)V s_i}{S} \quad (2.10)$$

Le paramètre β varie de 0 (allocation *ex post*) à 1 (allocation *ex ante*). Le Gestionnaire peut chercher le paramètre β qui maximise la valorisation totale de l'eau.

Jurriens et Mollinga (1996) proposent que les systèmes irrigués en Inde et au Pakistan se tournent vers une agriculture de production, en limitant le nombre d'irrigants, quitte à atteindre les objectifs de protection sociale à travers des politiques économiques plus globales. Ce système correspondrait à une allocation *ex post*. Cependant, en raison des résistances au changement, ils estiment qu'il serait plutôt préférable d'envisager une solution mixte entre le système tel qu'il a été conçu au départ, de type *ex ante*, et une allocation de type *ex post*.

2.2.6 Allocation *ex post* avec mutualisation du profit

Le principe est ici de réaliser une allocation de type *ex post* en cherchant à limiter le surassollement par une mutualisation des revenus. Il est donc nécessaire de faire ici l'hypothèse - peu commune - que, même si les compétences individuelles ne sont pas connues, la Collectivité connaît les revenus.

Un exemple en est néanmoins donné par Platteau et Seki (1998), dans leur étude sur les pêches au Japon. L'ensemble des pêcheurs connaît l'effort de pêche de chacun, i.e. le nombre de jours en mer, équivalent au choix de la surface irriguée. Il connaît aussi la production constituée par ce que chaque navire ramène au port. Les auteurs donnent l'exemple d'une pêcherie où à la fois les coûts et les profits sont partiellement mutualisés. Il aurait été techniquement possible de définir à partir des données précédentes un paramètre d'efficacité du pêcheur mais il est probable qu'un consensus soit apparu pour ne pas rendre aussi explicites les différences de compétences entre membres.

De plus, il est nécessaire que la taxe ne soit pas linéaire pour avoir un effet sur le choix de la surface irriguée. Si on prélève un montant proportionnel au carré de la marge brute, le profit individuel est :

$$\pi_i = s_i \left[a_i r \left(\frac{V}{S} \right) - k \right] - \theta \left[s_i \left[a_i r \left(\frac{V}{S} \right) - k \right] \right]^2 \quad (2.11)$$

Le paramètre θ caractérise le niveau de redistribution des revenus.

Au premier ordre : $0 = [a_i r(\frac{V}{S}) - k] - \theta \cdot 2 \cdot [a_i r(\frac{V}{S}) - k]^2 s_i$ d'où :

$$s_i = \frac{1}{2\theta (a_i r(\frac{V}{S}) - k)} \quad (2.12)$$

avec bien sûr $s \in [0, s_m]$.

L'ensemble des agriculteurs se répartit alors en trois groupes.

- Groupe A. De l'agriculteur 1 à l'agriculteur o tel que $a_o r(\frac{V}{S}) - k = \frac{1}{2\theta s_m}$, les agriculteurs mettent en culture irriguée une surface définie par l'équation (2.12) inférieure à la

surface maximale s_m . La règle choisie incite les agriculteurs compétents à ne pas mettre toute leur surface complètement en culture.

- Groupe B. De l'agriculteur o à m tel que $a_m r(\frac{V}{S(\theta)}) = k$, la surface est complètement mise en culture.
- Groupe C. De m à n les agriculteurs ne mettent rien en culture.

On peut choisir θ pour obtenir la surface totale mise en culture souhaitée (annexe 2-6). Il est aussi possible de déterminer le paramètre θ permettant la valorisation maximale de l'eau pour ce type de règle (voir annexe 2-6).

Néanmoins, **la répartition entre les différents agriculteurs est très mauvaise puisque, dans le groupe A, plus l'agriculteur est compétent, moins il met en culture.**

La valorisation totale sur le périmètre est alors :

$$W_{mut} = \frac{o(\theta)}{2\theta} + s_m \sum_{o(\theta)}^{m(\theta)} \left(a_i r\left(\frac{V}{S(\theta)}\right) - k \right) \quad (2.13)$$

2.2.7 Application avec une fonction de rendement de forme racine carrée

Prenons pour fonction de rendement $r(v) = \sqrt{v}$, de telle sorte que $g(v) = \frac{\sqrt{v}}{2}$ et $g^{-1}(u) = 4u^2$.

Nous n'avons pas à nous préoccuper du problème de dérivabilité en 0 puisque la présence d'un coût $k > 0$ à l'hectare fait que tous les calculs se font au-delà d'un certain voisinage de l'origine.

Pour le coefficient de capacité à valoriser l'eau, prenons $a_p = \frac{1}{p^\alpha}$, avec $0 < \alpha < \frac{1}{3}$. Lorsque α est proche de 0, le groupe est homogène, et le groupe devient hétérogène lorsque α croît.

Ce modèle permet aussi de rendre compte d'une hétérogénéité due à des pertes, soit dans le réseau, soit à cause du type de sol. En effet, ces pertes peuvent être paramétrées par b_i et conduire à un rendement de la forme $r(\frac{V_i}{b_i s_i})$. Le profit va alors s'écrire : $\pi_i = s_i [r(\frac{V_i}{b_i s_i}) - k]$.

Si on modélise ces pertes par un coefficient $b_p = \frac{1}{p^\beta}$, alors les résultats qui seront définis avec le coefficient α précédent seront aussi valables en posant $\alpha_p = \frac{1}{\sqrt{b_p}} = p^{\frac{\beta}{2}}$.

Nous avons déterminé les résultats pour deux types d'allocation *ex post* sans mutualisation des profits :

- quand le prix de l'eau w est nul (par exemple lorsque les agriculteurs paient une somme forfaitaire, tel qu'un abonnement) ou bien lorsqu'il est négligeable devant le coût fixe à l'hectare k ;
- quand les agriculteurs paient le prix qui correspond à la valorisation optimale sur l'ensemble du périmètre.

Dans ce contexte spécifique, les équations définissant les règles de gestion de l'eau ont été réécrites en annexe 2-6. Dans cette annexe, la table (2.2) présente une synthèse des résultats.

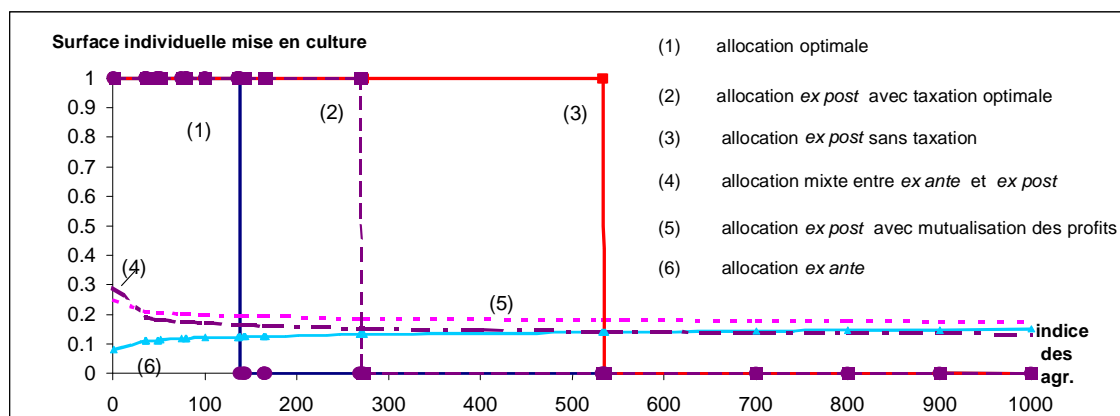
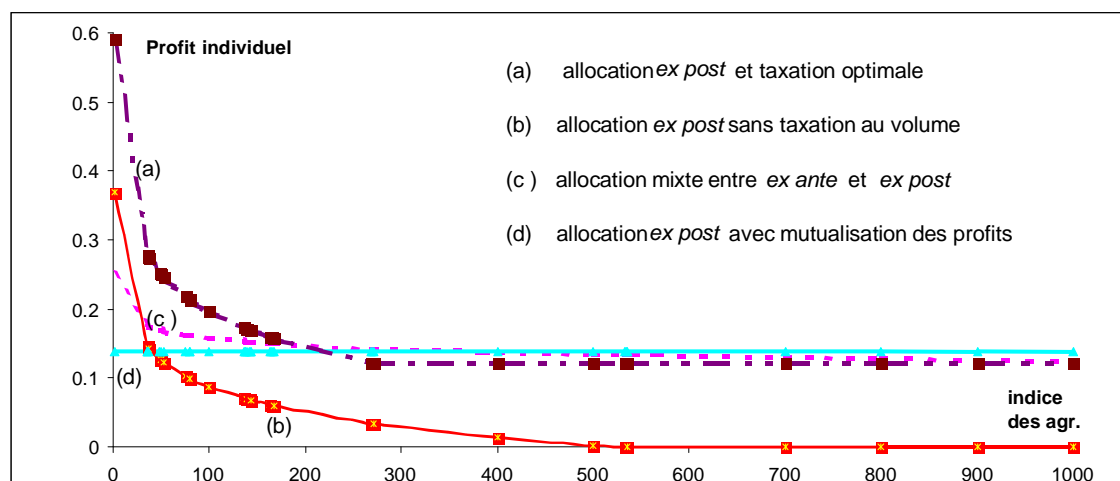
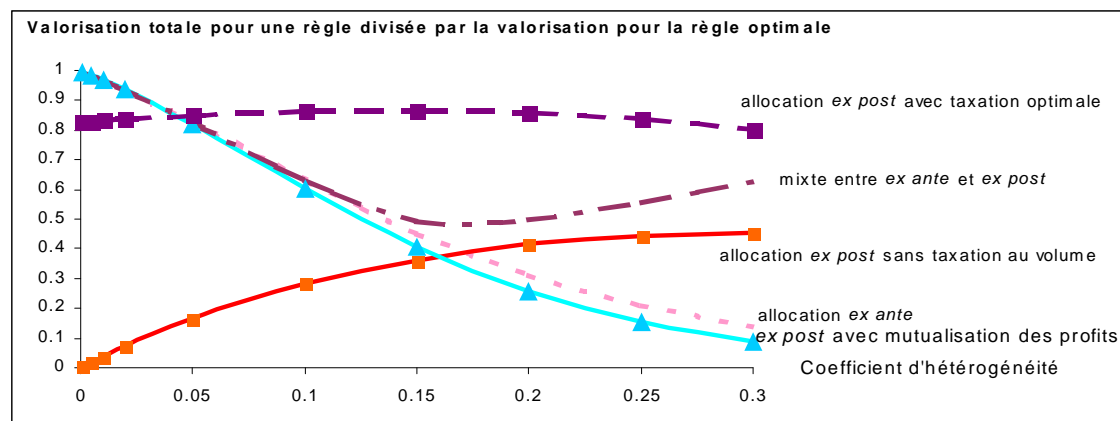
FIG. 2.2 – surfaces mises en culture pour $\alpha = 0.05$ pour les différentes allocationsFIG. 2.3 – profit individuel (avec les éventuelles taxes redistribuées de façon égales) pour $\alpha = 0.05$ 

FIG. 2.4 – ratio entre la valorisation totale pour une règle donnée et la valorisation pour l'allocation optimale

Les équations précédentes ont été calculées dans le cas où $n = V = 1000$ et $k = 1$. Le degré d'hétérogénéité α varie de 0 à 0.3. Pour $\alpha = 0.01$, les coefficients a_i varient ainsi dans un rapport de 1 à 1.07 tandis qu'avec $\alpha = 0.3$, le rapport est de 1 à 8. Des algorithmes d'optimisation ont permis de calculer les paramètres β et θ optimaux compte-tenu de l'hétérogénéité du groupe.

La figure (2.2) montre la surface mise en culture par chaque agriculteur dans un groupe plutôt homogène ($\alpha = 0.05$). On remarque deux groupes bien distincts.

- Un groupe où un agriculteur pivot définit une limite entre ceux qui mettent tout en culture et ceux qui ne mettent rien. L'allocation optimale fait partie de ce groupe, tout comme deux allocations conduisant à un surasselement : l'allocation *ex post* avec taxe optimale et l'allocation *ex post* sans taxe.
- Un groupe où chaque agriculteur met une partie de son champ en culture : l'allocation *ex ante*, celle mixte entre *ex ante* et *ex post* et enfin l'allocation *ex post* avec mutualisation du revenu (du moins pour ce faible niveau d'hétérogénéité).

La figure (2.3) donne les profits individuels pour le même degré d'hétérogénéité et en prenant en compte une redistribution à parts égales des taxes perçues. L'allocation optimale n'est pas représentée ici ; elle est à l'origine d'un profit de 2.30 pour l'agriculteur 1 jusqu'à un profit de 1 pour l'agriculteur pivot. Sur ce graphique, les courbes des règles *ex ante* et mixte étaient proches et ont été donc confondues. Cette figure permet de donner une idée de l'équité des différentes règles étudiées.

Enfin, la figure (2.4) présente le ratio entre la valorisation totale pour une règle d'allocation donnée et la valorisation totale pour l'allocation optimale. Nous avons choisi de représenter ce résultat sous forme de ratio car, avec notre modélisation de l'hétérogénéité, la valorisation optimale totale diminue avec l'hétérogénéité du groupe.

Ces calculs montrent que pour un groupe plutôt homogène ($\alpha = 0.05$) l'allocation avec mutualisation du profit n'incite pas à mettre une surface importante en culture (figure 2.3), puisque les agriculteurs obtiennent le même profit de toute façon. Avec un groupe plus hétérogène, par exemple $\alpha = 0.2$, on retrouve les trois sous-ensembles décrits dans la partie théorique, avec $o = 100$ et $m = 300$. Les cent premiers agriculteurs préfèrent alors limiter leur surface mise en culture, les deux cents suivants mettent tout en culture, et enfin les agriculteurs restants renoncent à semer.

Steiner et Walter (1992) testent une règle de répartition de type *ex ante* et une règle de répartition avec priorité de l'amont vers l'aval, avec un modèle leur permettant de calculer la valeur totale produite sur le périmètre. Lorsqu'ils simulent différents niveaux de pertes sur le réseau, ils obtiennent que, jusqu'à 80% d'efficacité de distribution moyenne sur le réseau, la règle *ex ante* est meilleure, mais qu'au delà c'est la règle de type *ex post* qui donne une meilleure production. Ce résultat, d'ailleurs assez intuitif, est cohérent avec notre figure (2.4).

Proposition 7 *Dans le cadre théorique présenté ci-dessus, les résultats suivants ont été montrés.*

- *En ce qui concerne la valorisation totale de l'eau, plus le groupe est homogène, plus l'allocation *ex ante* est proche de l'allocation optimale et, en revanche, plus le groupe est hétérogène, plus l'allocation *ex post* est proche de l'allocation optimale.*

- Pour un groupe plutôt homogène, les allocations *ex ante*, mixte et *ex post* avec mutualisation sont à peu près équivalentes du point de vue de la surface totale mise en culture et de la valorisation totale.
- L'allocation mixte entre *ex ante* et *ex post* permet un gain significatif lorsque le groupe est hétérogène.
- Une allocation *ex post* avec un prix élevé permet de révéler de façon indirecte les caractéristiques des agents et conduit à une valorisation de l'eau assez efficace.
- Finalement, l'allocation *ex post* avec mutualisation ne donne jamais de meilleurs résultats que l'allocation *ex ante* et, de plus, est techniquement plus difficile à mettre en œuvre.

Si l'analyse avait été faite avec un modèle de simulation des pertes sur le réseau, i.e. une fonction de production de la forme $r(a_i \frac{V_i}{s_i})$, on aurait pu aussi tester une règle d'allocation de type *ex ante* où le Gestionnaire compense les agriculteurs de leur perte. Chaque agriculteur reçoit alors un volume total $V_i = \frac{V}{a_i \sum (\frac{1}{a_j})}$ de telle sorte qu'on ait bien $\sum V_i = V$. Chaudry et Young (1990) simulent une modification du *warabandi* au Pakistan qui permettrait de mettre en œuvre une telle règle, avec un modèle de choix d'assolement qui tient compte de l'impact du stress hydrique sur les revenus. Ils montrent que, du fait de la concavité de la fonction de production, réallouer l'eau de l'amont vers l'aval permet d'avoir une valorisation de l'eau qui fait plus que compenser la diminution de l'efficacité moyenne de distribution. Evidemment, un tel résultat n'est valable que si les pertes en eau sur le réseau ne sont pas trop importantes. Ce résultat équivaut au fait que, pour l'allocation optimale caractérisée ici, l'optimum économique ne consiste pas à donner aux agriculteurs en amont toute l'eau nécessaire pour qu'ils se trouvent avec un rendement maximal $r = r_m$.

2.2.8 Équité des règles d'allocation

La façon la plus *visible* de mesurer l'équité est de mesurer un indice d'équité.

Steiner et Walter (1992) comparent différentes règles en utilisant pour critère le ratio interquartile, i.e. la moyenne des revenus des 25% des agriculteurs touchant le plus faible revenu divisé par le revenu moyen sur l'ensemble de la population.

Nous utilisons ici pour indice d'équité l'écart-type. Il n'existe pas d'indice d'équité vérifiant l'ensemble des axiomes qu'il est possible de définir dans une telle situation (Fleurbaey, 1996). A défaut, l'écart-type vérifie au moins :

- le principe de cohérence : si l'équité diminue dans une partie d'un ensemble, le reste restant constant, elle diminue aussi pour l'ensemble ;
- le principe de transfert (Pigou-Dalton) : l'équité diminue lorsqu'on transfère de l'argent d'un agent riche vers un agent pauvre ;
- l'invariance λ : l'équité est indifférente à une augmentation proportionnelle de bien-être entre les agents.

Pour Sampath (1990), l'indice de Theil $H(y) = \sum y_i \log \frac{1}{y_i}$ vérifie les différents axiomes attendus pour l'analyse de périmètres irrigués ; cependant cet indice ne vérifie pas l'axiome d'invariance λ .

Nous calculons l'équité des différentes règles étudiées dans la section précédente pour un groupe homogène ($\alpha = 0.001$) et pour un groupe hétérogène ($\alpha = 0.3$) (fig. 2.5 et 2.6).

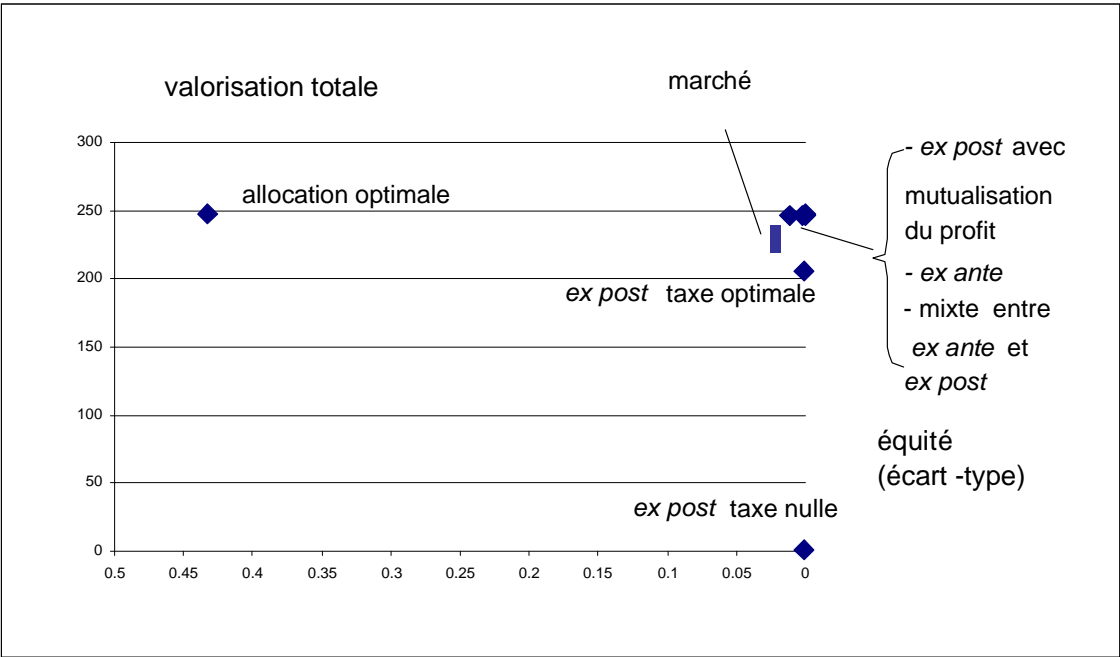


FIG. 2.5 – dilemme équité-valorisation de l’eau pour un groupe homogène ($\alpha = 0.001$)

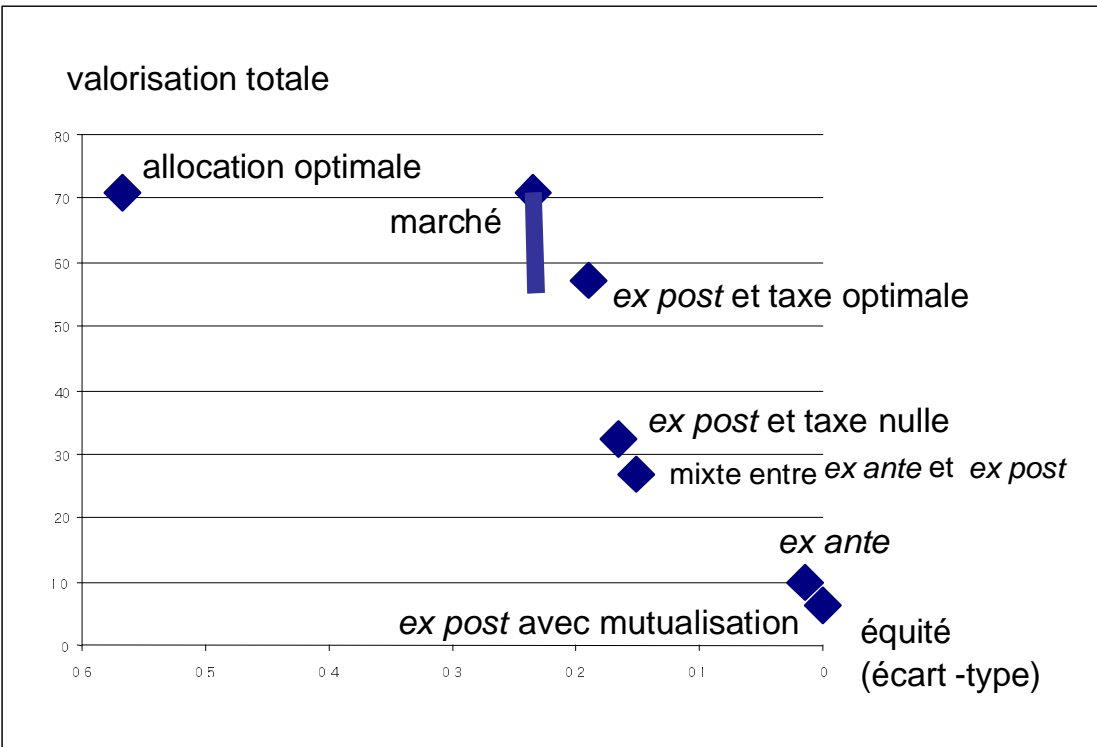


FIG. 2.6 – dilemme équité-valorisation de l’eau pour un groupe hétérogène ($\alpha = 0.3$)

Le marché est symbolisé par une barre, de façon à représenter le fait que le marché peut donner lieu à une valorisation plus ou moins importante de l'eau en fonction de ses coûts de mise en œuvre.

Le dilemme équité-valorisation de l'eau est particulièrement visible dans le cas d'un groupe hétérogène. Small et Rimal (1996) présentent eux aussi un graphe montrant les différents compromis possibles entre objectifs d'équité et valorisation de l'eau.

On remarque que, dans le cas d'un groupe homogène, l'allocation *ex post* avec mutualisation conduit à une bonne valorisation de l'eau. Il est possible de dresser un parallèle avec l'approche de Ray et Ueda (1996) qui montrent deux conséquences lorsque, dans le cas d'une production collective d'un bien, l'effort de chacun est observable et, quels que soient les efforts des différents agents, le bien est réparti de façon à optimiser le bien être collectif¹. La première conséquence, intuitive, est que tout équilibre conduit à une sous-production. La deuxième, beaucoup moins intuitive, est que plus la fonction d'utilité est égalitariste (i.e. tend vers une fonction de Rawls), plus le degré de sous-production est faible.

Le parallèle avec notre cas tendrait à montrer (même si la démonstration n'est pas faite) que, dans le cas d'homogénéité entre les agriculteurs, allouer *ex post* l'eau selon plus d'équité (i.e. donner plus d'importance à maximiser le revenu le plus faible par rapport à la valorisation totale de l'eau) conduit *ex ante* à moins de surproduction.

En fait, la donnée d'un indice d'équité permet une description complète de l'équité en économie d'échange, autrement dit lorsque la richesse totale à partager est constante.

Le contexte ici est celui d'une économie de production : l'indice d'équité n'est plus alors suffisant puisqu'il peut exister des allocations qui conduisent à un mauvais indice d'équité et qui constituent cependant une Pareto-amélioration de toutes les autres. Ainsi, dans le cas étudié ici, la figure (2.3) montre que :

- l'allocation *ex post* avec tarification optimale est une Pareto-amélioration de l'allocation *ex post* avec tarif nul ;
- il suffirait d'effectuer une faible redistribution des produits de la taxe de cette allocation, des plus compétents vers les moins compétents, pour que cette règle soit aussi une Pareto-amélioration de toutes les autres règles !

L'indice d'équité conserve néanmoins un intérêt, parce que l'acceptation d'une règle n'est pas que liée à la valeur absolue qu'en tire chaque agriculteur : la valeur relative est elle aussi très importante².

Il serait nécessaire en théorie de décrire l'ensemble des allocations Pareto-optimales pour pouvoir bien décrire le dilemme équité - efficacité. La structure du modèle (maximisation sous contrainte d'équilibre de Nash) rend quasi-impossible une telle description générale : il nous semble nécessaire de devoir se contenter de comparer au cas par cas les conséquences des différentes règles envisagées.

¹voir aussi la présentation de leur modèle p. 59.

²c.f. l'étude de Ito et al. (1995) où les agents maximisent leur revenu relativement à celui des autres, voir p. 58.

Vues du terrain

En Tunisie, les règles de priorité entre cultures sont en théorie équitables parce qu'à cause des contraintes culturelles, tous les agriculteurs sèment une année ou l'autre des cultures d'hiver ou du maraîchage. En pratique, elles avantagent les agriculteurs proches du forage ou influents qui, sûrs de leur poids politique, sèment plus : à El Melalsa comme à Bled Abida les gens proches du forage cultivent beaucoup plus de maraîchage. A El Melalsa, certains agriculteurs ont renoncé à faire du maraîchage, la plupart en font 1 année sur trois..., et l'un des dirigeants de l'AIC plante du melon une année sur 2 !

Dans le bassin de l'Adour, les sols riverains sont hétérogènes. Il avait été question, à l'occasion de la création du barrage de Gardères-Eslourenties, de définir des quotas en fonction des caractéristiques de sols. Outre la difficulté technique d'estimer les différents types de sols, l'idée n'a pas abouti parce que **les agriculteurs estiment que le prix d'achat et de vente reflète déjà la nature des sols** et que la Collectivité n'a pas à avantager tel ou tel agriculteur sur ce critère : dans ce contexte, la règle *ex ante* a été la seule règle considérée comme équitable³.

2.3 Application au périmètre irrigué d'El Melalsa

Le périmètre irrigué d'El Melalsa distribue de l'eau à partir d'un forage délivrant en moyenne, compte-tenu des pertes de charge, 24 l/s répartis en trois mains d'eau, sur une surface de 160 ha pour 54 exploitants. Le système cultural repose pour l'essentiel sur la culture du blé de début novembre à fin avril, puis du melon l'année suivante de la mi-mars à fin juin, puis du piment associé à la fève de début septembre à la mi-mars (figure A.2 en annexe A). Pour le blé, nous distinguerons une période 1 de début novembre à la mi-mars et une période 2 de la mi-mars à la fin avril, période de chevauchement avec le melon.

La source principale d'hétérogénéité est l'existence d'importantes pertes sur plus de la moitié du réseau.

Depuis le début du périmètre il y a 8 ans, un tour d'eau est défini entre agriculteurs. Chacun peut irriguer autant qu'il le souhaite lorsqu'il a la main d'eau, et il n'y a pas de contrôle sur les surfaces mises en culture. Dans ce contexte, les agriculteurs ont semé pendant l'année 98-99 61 ha de blé, 21 ha de fève et de 27 ha de melon. Les agriculteurs reconnaissent que même si les pluies avaient été d'ampleur moyenne, une telle surface collective aurait causé un tour d'eau très long en mars 1999, d'au moins 10 jours, et les cultures n'auraient pas été correctement irriguées : on peut parler d'un surasselement. En fait, la quantité de pluie a été faible ce printemps là et les responsables du GIC ont décidé d'attribuer l'eau au cas par cas, ce qui a conduit à une faible équité dans la distribution.

Par ailleurs, l'eau est un bien commun au sein du périmètre irrigué : un agriculteur n'a pas de compensation à demander si le Président et l'aiguadier décident de retarder son tour d'eau pour inclure un agriculteur qu'ils considèrent comme prioritaire.

³Cela dit, dans le bassin du Son-Sonnette, en Charente, et dans celui du Clain dans la Vienne, des niveaux de quotas d'eau sont définis en fonction du type de sols (Allain, 2000).

Nous simulons ces choix d'assolement pour déterminer si l'équilibre de Nash associé à la règle utilisée rend compte de l'assolement réalisé. De plus, nous simulons ce que donnerait une règle *ex ante*, avec un quota d'heures par hectare puis une règle de type *ex post* avec un contrôle de la durée du tour d'eau et de règles de priorité entre culture.

Sur les 54 agriculteurs, nous en avons exclu 10 qui possèdent un puits dans ou à proximité du périmètre et qui de fait ne participent pas au tour d'eau. Nous faisons ensuite la distinction entre les agriculteurs qui ont un puits hors du GIC (type A) et ceux qui n'en possèdent pas (type B). De façon générale, les agriculteurs de type A cultivent toujours du maraîchage hors du GIC et devront donc payer de la main d'œuvre s'ils cultivent du maraîchage dans le GIC : ils ne le feront que si les conditions d'accès à l'eau sont bonnes.

Les choix d'agriculteurs sont simulés par un modèle de programmation linéaire en univers certain. Les détails de la simulation sont donnés en annexe 2-7.

2.3.1 Simulation de différentes règles d'allocation

Tour d'eau avec une durée individuelle d'irrigation libre

Méthode générale

Nous commençons la simulation avec une surface collective en melon, piment-fève et blé qui peut être considérée comme satisfaisante d'un point de vue collectif. La valeur de cet assolement initial a peu d'importance puisque, pour cette simulation effectuée tout du moins, il est apparu qu'il n'existe qu'un assolement d'équilibre.

Cet assolement est utilisé en entrée d'un logiciel de bilan hydrique au pas de temps journalier qui permet de calculer la longueur du tour d'eau nécessaire pour que chaque champ, lorsqu'il obtient l'eau, soit suffisamment irrigué. Cette simulation permet de donner un rendement commun pour tous les champs cultivés avec la même culture : le rendement ne dépend donc plus de la place dans le réseau.

Les quantités d'eau apportées augmentent néanmoins avec la distance au forage, en raison des pertes sur le réseau. Par conséquent, au sein de chacun des types A et B, il existe un groupe d'agriculteurs situés loin du forage qui peuvent décider de ne pas semer de melon en raison d'un coût de l'eau trop important. On donc définir un niveau seuil pour chacun des types, qui les divise en eux sous-groupes : les agriculteurs des sous-types A1 et B1 ont un coefficient de pertes sur le réseau plus faible que le niveau seuil et sèment du melon tandis que le coefficient des sous-types A2 et B2 est supérieur au niveau seuil et ces deux derniers types ne cultivent que du blé et du piment-fève. Ce seuil dépend bien-sûr du rendement des différentes cultures.

Ensuite, un agriculteur moyen est calculé pour chacun des sous-types, ce qui permet de simuler la surface mise en culture en melon pour chacun des sous-types (voir annexe 2-7). On en déduit alors la surface totale mise en culture en melon, qui est dans un deuxième temps comparée à la surface initialement supposée.

Si la surface totale mise en culture en melon par les sous-groupes A1 et B1 est supérieure à la surface supposée initialement, on recommence la simulation avec une surface initiale plus importante. De même, on diminue la surface initiale si A1 et B1 mettent in fine moins en culture que supposé initialement.

Application

Nous commençons avec un assolement de 15 ha de melon et de 71.6 de piment-fève. Le tour d'eau pour le melon est alors court : les rendements sont de 6.6 t/ha pour le piment-fève et de 10.5 t/ha pour le melon. Les seuils de perte se situent alors à 0.15 pour le type B et 0.25 pour le type A : tous les agriculteurs cultivent du melon (voir fig 2.7).

En fait, les agriculteurs sèment toujours un tiers de leur surface en blé (voir annexe) donc l'assolement possible total vérifie la contrainte que la somme des surfaces en melon et en piment-fève vaut 86.6.

Après plusieurs essais, la convergence est atteinte pour une surface en melon de 28 ha. Sur la figure (2.7) sont rapportées deux étapes "extrêmes" ainsi que l'assolement de convergence. Si la surface totale mise en culture reste constante, le rendement réel du blé dépend évidemment des choix de surface en melon et en piment-fève ; nous ne l'avons pas cependant indiqué car il ne joue pas de rôle déterminant dans le choix de l'assolement.

A l'assolement de convergence correspondent des rendements de 5.8 t/ha pour le piment-fève et de 6.9 pour le melon, les volumes apportés étant respectivement de 1288 et 1592 m³/ha. Le seuil est alors de 0.45 pour le type A, c'est-à-dire que le groupe A1 est composé de 9 agriculteurs possédant ensemble une surface dans le périmètre de 26.8 ha. Le niveau seuil est de même 0.45 pour le type B, i.e. le type B1 est composé de 26 agriculteurs représentant une surface totale de 80.6 ha (table 2.1). De plus, l'agriculteur type A1 moyen a une main d'œuvre de 2.3 et possède 8 ha hors du périmètre : vu le coût de la main d'œuvre, ce type A1 ne met que 0.33 ha en culture de melon dans le périmètre, soit 4.4 ha pour l'ensemble du type.

La figure (2.7) montre un basculement très brutal du seuil d'une surface initiale à l'autre. Cet effet est dû au fait que la simulation s'est faite avec, à chaque fois, uniquement quatre agriculteurs moyens représentant chacun un sous-type. Le basculement correspond à un changement de base optimale pour un voire deux sous-types ainsi représentés. Il aurait été possible d'obtenir un effet plus progressif en ne simulant pas l'agriculteur moyen, mais en déterminant l'agriculteur pivot, dont le niveau de perte correspond à un changement d'assolement. Cependant, il aurait été nécessaire alors de ne plus calculer des valeurs moyennes sur un type mais de raisonner sur un agriculteur précis ; or les agriculteurs ont en fait, individuellement, des caractéristiques très hétérogènes. Il n'aurait pas été intéressant d'utiliser les caractéristiques particulières des différents agriculteurs potentiellement pivots pour déterminer le seuil.

Si on compare avec les assolements réels, **les surfaces totales obtenues sont relativement proches des surfaces réellement mises en culture** (figure 2.8).

Quant au stress hydrique, l'enquête menée nous a permis de mesurer un rapport (rendement réel/rendement potentiel) moyen de 0.26 contre 0.45 simulé. Cette différence vient de l'important manque d'équité dans la distribution de l'eau.

Allocation *ex ante*

Nous simulons ici ce que seraient les choix des agriculteurs si on décide de maîtriser la longueur du tour d'eau en attribuant à chacun un quota d'heures proportionnel à la surface possédée. Chaque agriculteur fait donc ses choix individuellement, indépendamment des autres. Un des résultats est que tous les agriculteurs cultivent du melon (figure 2.8).

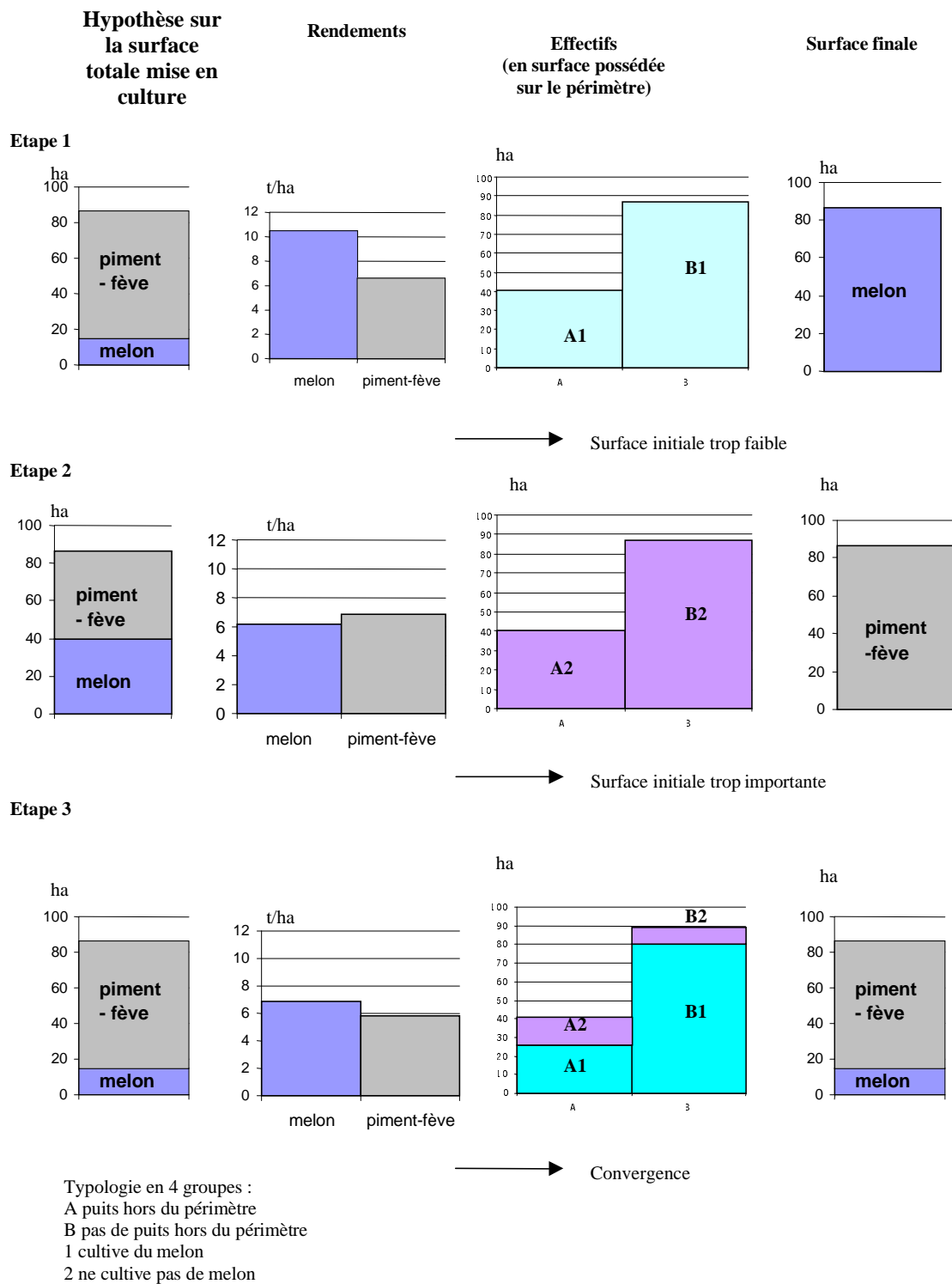


FIG. 2.7 – différentes étapes de simulation pour atteindre l'assolement à l'équilibre

TAB. 2.1 – les types d'agriculteurs à El Melalsa, selon les décisions d'assolement à l'équilibre pour la règle *ex post* avec durée individuelle libre

Type	Nombre d'éléments	SAU moyenne par agriculteur dans le GIC	Surface totale du type dans le GIC	Surface cultivable hors du GIC	Main d'œuvre	Coefficient moyen de pertes	Volume d'eau disponible hors du GIC (m ³ /j)
A1	9	2.9	26.1	8	2.3	0.77	346
A2	3	4.8	14.4	12	2.7	0.31	346
B1	26	3.1	80.6	6	1.9	0.75	0
B2	6	1.4	8.4	0.6	2.2	0.28	0

Allocation *ex post* selon les surfaces mises en culture

Nous utilisons le même formalisme que pour l'allocation *ex ante* mais ici le volume distribué pendant la période 2 est proportionnel à la surface mise en culture. **L'intérêt de cette règle est que la durée du tour d'eau reste contrôlée.**

Nous faisons aussi l'hypothèse que le melon doit recevoir une quantité d'eau correspondant à ses besoins (i.e. l'agriculteur va limiter si besoin est sa surface mise en culture en melon), tandis que l'eau éventuellement non utilisée pour l'irrigation du melon en période 2 pourra être utilisée pour irriguer le blé. Nous débutons avec une surface collective de 25 ha semée en melon. A cette surface correspond à un volume distribué par hectare semé en melon $v_{mel} = 3974 \text{ m}^3$. Le coefficient seuil entre ceux qui choisissent de faire du melon et les autres est alors de 0.32 pour les deux types, soit une surface mise en culture en melon de 40 ha. Lorsqu'on débute avec une surface initiale de 32 ha, $v_{mel} = 2484 \text{ m}^3$ et le seuil est de 0.41 pour les deux types. A part un agriculteur dans le groupe B, on obtient en fait la même répartition qu'avec la règle *ex post* sans contrôle de la durée individuelle d'irrigation. Les simulations effectuées sur des agriculteurs moyens donnent 9 ha de melon pour le sous-type A1 et 23 ha de melon pour B1.

2.3.2 Comparaison

Les règles *ex ante* et *ex post* permettent une bien meilleure valorisation de l'eau, pour tous les types d'agriculteurs (fig. 2.8).

En fait, la règle *ex post* selon les surfaces mises en culture valorise mieux l'eau que la règle actuelle parce qu'elle rend possible le contrôle de la durée du tour d'eau. Elle valorise aussi l'eau quasiment autant que la règle *ex ante* : si on cherchait à situer cette situation par rapport au cadre théorique présenté ci-dessus et illustré sur la figure (2.4), le coefficient d'hétérogénéité α serait donc de l'ordre de 0.15. **Dans le cadre de l'analyse faite dans la partie théorique, on peut en déduire que l'inégalité résultant des pertes sur le réseau peut être considérée comme moyenne.**

Autrement dit : **l'inefficacité liée à l'équilibre de Nash de surassolement est du même ordre de grandeur que celle qui serait engendrée si la même quantité**

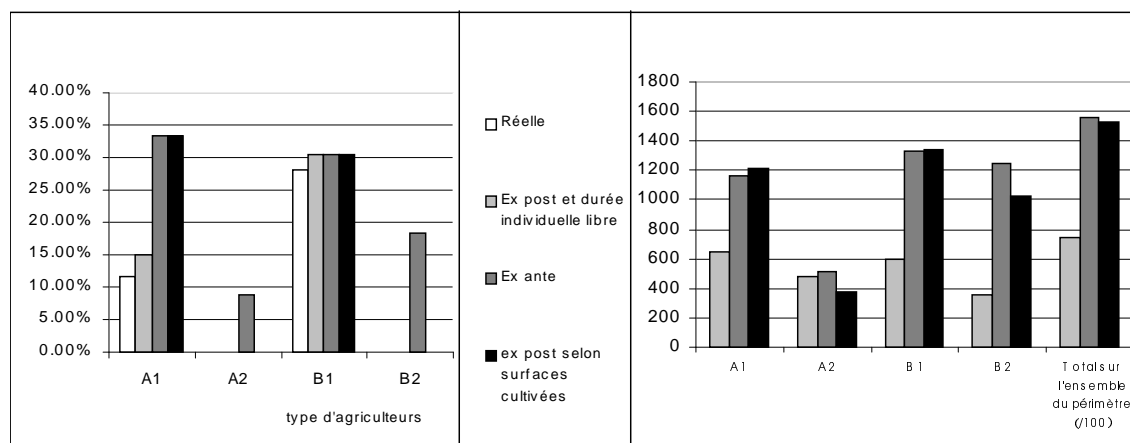


FIG. 2.8 – pour chaque type d'agriculteur, (a) la part du melon sur la surface totale cultivable, (b) le profit à l'hectare issu des cultures du périmètre, pour les différentes allocations

d'eau était allouée à tous les agriculteurs quelles que soient leurs places dans le périmètre.

Selon l'un des agriculteurs d'El Melalsa, 25 ha de maraîchage pourraient être mis en culture avec le réseau actuel si l'organisation était bonne. La surface qu'il propose est inférieure aux 32 ha obtenus avec la règle d'allocation *ex post* avec durée individuelle libre, elle-même inférieure à la surface semée en melon avec la règle *ex ante* (fig 2.8). Cet agriculteur pense qu'avec l'organisation actuelle, il serait nécessaire de limiter à 12 ha la surface mise en cultures maraîchères.

Enfin, l'intégration du risque aurait permis de prendre en compte le fait que les agriculteurs qui ont un puits hors du périmètre peuvent prendre davantage de risque dans le périmètre et ainsi forcer les autres agriculteurs à ne pas semer de cultures maraîchères.

2.4 Des compléments aux règles pour les rendre plus efficaces

En fait, les allocations *ex ante* et *ex post* sont souvent accompagnées de règles complémentaires pour les rendre plus efficaces.

2.4.1 Réallocation informelle après une allocation *ex ante*

L'allocation *ex ante* est associée à des règles plus ou moins informelles permettant d'ajuster les besoins aux demandes en cours de campagne. En Tanzanie, les agriculteurs peuvent s'échanger ou même acheter leur tour d'eau (Gillingham, 1999), et de même au Kenya (Adams et al., 1997). Ces échanges existent aussi dans le système *warabandi*, mais leur caractère informel empêche d'égaliser les valorisations de l'eau à l'échelle supérieure, celle des canaux secondaires (Strosser, 1997). De tels échanges existent aussi, ponctuellement, sur le système Neste (Montginoul et Rinaudo, 1999) et au Mexique (Verdeil, 1993).

2.4.2 Contrôle de surfaces mises en culture avant l'allocation *ex post*

Une possibilité pour réaliser une allocation équitable et valorisant bien la ressource si le système n'est pas trop hétérogène consiste à associer un contrôle des surfaces mises en culture et une allocation *ex post*. Autrement dit, un contrôle des surfaces semées est effectué en début de campagne, puis l'irrigation se fait à la demande.

Par exemple, en Tunisie, les agriculteurs ne peuvent souvent mettre qu'un tiers de leur surface en culture irriguée l'été et deux tiers pendant l'hiver, à l'exclusion des agriculteurs qui possèdent une surface inférieure à 1 hectare (Faÿsse, 2000). Cette règle a été édictée par l'Etat tunisien dans les Périmètres Publics Irrigués depuis une vingtaine d'années. De même, dans le périmètre colombien de Coello, qui s'étend sur 25 000 ha, l'association d'usagers en charge de la gestion a mis en place un zonage et une rotation des zones cultivables en riz, en excluant les zones trop sableuses. Elle délivre ensuite des quantités d'eau en fonction des types de plantes réellement cultivées (Vermillon et al., 1996). Ce système repose dans les deux cas sur des associations d'usagers fonctionnant correctement, avec notamment des mécanismes de contrôle et de punition en cas de dépassement des surfaces prescrites.

Ce système est utilisé à Souaidia, avec en plus une **gestion explicite des conflits** qui, en accord les principes d'Ostrom (1990), permet au système d'être stable dans le temps. Le Comité du GIC se réunit avant le semis des cultures d'été et, en fonction des demandes des agriculteurs et de la règle précédente, décide des surfaces que chacun peut mettre en culture. L'aiguadier délivre alors 450 m³ par hectare pour les premières irrigations.

Lorsqu'un agriculteur veut frauder, i.e. semer plus que ce qui a été convenu, il utilise le fait que la deuxième ou la troisième irrigation de semis n'ont souvent pas besoin de 450 m³/ha : le volume non utilisé pour l'irrigation des premiers semis sert pour commencer l'irrigation de semis d'une nouvelle surface. "Il y a des gens qui viennent planter la nuit", raconte le trésorier. La règle est alors que s'il est découvert tôt, le GIC lui refuse cette extension. En revanche, s'il est découvert tard, son "extension" est acceptée.

La règle est appliquée efficacement : tous les agriculteurs mettent 1/3 de leur surface en culture pendant l'été, sauf les plus petits..., et le représentant local de l'autorité administrative, le *omda**.

A Bled Abida, le trésorier a été auparavant l'aiguadier du périmètre public irrigué M'jabraa, voisin de Bled Abida. Il pense qu'effectivement, un tour d'eau avec contrôle à la surface et ensuite une irrigation à la demande sont bien meilleurs qu'un tour d'eau où chaque agriculteur est libre de semer ce qu'il veut et ensuite doit répartir une quantité donnée sur ses champs. En effet, dans le deuxième cas, la gestion au quotidien de la pénurie est très difficile, les agriculteurs refusant d'arrêter d'irriguer tant que leur champ n'a pas reçu suffisamment d'eau. De plus, lorsqu'un agriculteur n'utilise pas son droit d'eau, il y a une modification du tour d'eau qui provoque souvent des conflits (par exemple, l'agriculteur qui a passé son tour le réclame peu après).

Bled Abida n'a pas réussi à mettre en place une telle règle de gestion, même si elle a été proposée en 1980 par les services de l'OMIVAK, devant l'inefficacité de la gestion de type *ex post* sans contrôle des surfaces qui existait alors (voir annexe A de la thèse).

2.5 Conclusion

Dans le contexte d'un périmètre irrigué où les agriculteurs valorisent l'eau différemment, on a caractérisé l'allocation optimale en ce qui concerne la valorisation de l'eau. Néanmoins, cette méthode dépend de la connaissance des coefficients de valorisation par le Gestionnaire, ce qui est rarement le cas.

Un marché permet d'atteindre cet optimum sans connaître ces informations. Cependant, même si le coût d'acquisition de l'information va probablement diminuer et ainsi rendre le marché plus facile à mettre en œuvre, dans de nombreux pays le statut de bien collectif attribué à l'eau restera un obstacle. Un mécanisme de révélation peut être utilisé mais il est difficile à mettre en œuvre et les taxes complexes ne sont pas aisément acceptées par les agriculteurs. A notre connaissance, aucun mécanisme de révélation n'est actuellement utilisé pour allouer l'eau d'irrigation. En revanche, il serait très intéressant d'écrire le menu de contrats correspondant à ce mécanisme de révélation, d'après le principe de taxation.

Les règles existantes, *ex ante* ou *ex post*, ont l'avantage de ne pas faire appel à la connaissance des capacités à valoriser l'eau. Selon le degré d'hétérogénéité du groupe, une bonne allocation sera la règle *ex ante* ou *ex post*. Une règle mixte entre les deux précédentes peut donner de bons résultats, en particulier si le groupe est hétérogène. Enfin, une taxe convexe associée à une allocation de type *ex post*, de façon à partager les profits, incite les meilleurs agriculteurs à ne pas valoriser au mieux leur surface.

Par ailleurs, nous avons ici considéré que l'hétérogénéité des agriculteurs était une donnée exogène, fixe. Evidemment, il peut être intéressant, pour limiter le dilemme entre équité et efficacité, de diminuer cette hétérogénéité :

- lorsqu'il s'agit de pertes sur le réseau, on peut envisager une réhabilitation de ce dernier (voir chapitre 6) ;
- lorsque les agriculteurs ont des compétences différentes, une intervention sous forme de formations et d'appui technique est envisageable.

2.6 Annexes du chapitre 2

Annexes 2-1 Allocation optimale

Le Lagrangien du problème (2.1) est :

$$\Lambda = \sum s_i \left(a_i r' \left(\frac{V_i}{s_i} \right) - k \right) + (\lambda - w)V - \lambda \sum V_i - \sum \mu_i (s_i - s_m) \quad (2.14)$$

Une des conditions du premier ordre égalise les valorisations marginales entre agriculteurs :

$$\forall i \quad a_i r' \left(\frac{V_i}{s_i} \right) = \lambda.$$

Par conséquent :

$$\forall i \quad v_i^* = r'^{-1} \left(\frac{\lambda}{a_i} \right) \quad (2.15)$$

La fonction r' est décroissante donc r'^{-1} l'est aussi : v_i^* croît avec a_i et donc décroît en i . Nous vérifions que les agriculteurs les plus compétents obtiennent plus d'eau à l'hectare que les autres. De plus, les surfaces individuelles mises en culture vérifient la condition de premier ordre :

$$a_i r(v_i^*) - v_i^* a_i r'(v_i^*) = a_i g(v_i^*) = k + \mu_i \quad (2.16)$$

Par conséquent, nous pouvons distinguer deux groupes d'agriculteurs :

- ceux pour qui $\mu_i = 0$, donc $s_i < s_m$ et le volume à l'hectare alloué par le Gestionnaire correspond à celui qu'aurait choisi l'agriculteur s'il était seul ;
- ceux pour qui $\mu_i > 0$, donc $s_i = s_m$ et le volume à l'hectare est supérieur à celui qu'apporterait l'agriculteur seul.

D'après l'équation (2.15), v_i est croissant en a_i , donc la fonction $g(u)$ est croissante. Par conséquent, d'après (2.16), si $a_i > a_j$ alors $a_i g(v_i^*) > a_j g(v_j^*)$ et $\mu_i > \mu_j$. Puisque $a_1 > a_2 \dots > a_n$, nous avons aussi $\mu_1 > \mu_2 \dots > \mu_n$.

Supposons que l'agriculteur q soit le premier de la liste qui vérifie $\mu_q = 0$, soit : $a_q g(v_q^*) = k$. Alors, pour $i < q$: $s_i = s_m$: tous les agriculteurs plus compétents que lui auront mis toute leur surface en culture.

De même, pour $i > q$, supposons que $s_i > 0$, alors $v_i^* < v_q^*$, d'où $g(v_i^*) > g(v_q^*)$, et $\frac{k}{a_i} > \frac{k}{a_q}$ ce qui donne $a_i < a_q$ ce qui est impossible.

Par conséquent $s_i = 0$ pour $i > q$, ce qui est intuitif : si l'agriculteur q ne met pas tout en culture, *a fortiori* un agriculteur de technicité inférieure ne fera pas mieux sur une partie de sa terre.

Enfin, on a, pour tout i plus petit que q : $a_i r' \left(\frac{V_i}{s_m} \right) = \lambda$ soit $V_i = s_m (r')^{-1} \left(\frac{\lambda}{a_i} \right)$. D'où :

$$V = s_m \sum_{i=1}^q (r')^{-1} \left(\frac{\lambda}{a_i} \right) \text{ ce qui donne une fonction implicite } \lambda(q).$$

Annexe 2-2 Démonstration des propriétés 4 et 5

L'idée de la démonstration de la propriété 4 consiste à définir un espace de fonctions au sein duquel la contrainte d'équilibre de Nash entre agriculteurs est équivalente à la définition d'un opérateur qui associe, à un couple (f, t) , l'ensemble des n surfaces individuelles, fonctions de réaction des agriculteurs et la surface totale somme de ces

fonctions. Un tel opérateur peut alors être inséré dans la fonction de bien-être total à optimiser et remplacer la contrainte.

Ensuite, la condition de premier ordre est calculé comme un léger déplacement dans l'espace des fonctions qui doit correspondre à une différentielle totale nulle.

Définition d'un opérateur de Nash

Si nous nous restreignons au sous-ensemble convexe $L \subset (C^1((R^+)^3 \rightarrow R))^2$ défini par $\{\forall (s, S, V) \in (R^+)^3, \frac{\partial^2 f}{\partial s^2} \leq 0 \text{ et } \frac{\partial^2 t}{\partial s^2} \geq 0\}$, la condition de second ordre du programme :

$$\text{Arg Max}_{s_i} s_i [a_i r(\frac{f(s_i, \sum s_i, V)}{s_i}) - k] - t(s_i, \sum s_i, V)$$

est toujours négative, donc ce programme est équivalent à la condition de premier ordre :

$$\forall i \in I \quad a_i r(\frac{f}{s_i}) + (\frac{\partial f}{\partial s_i} - \frac{f}{s_i}) a_i r'(\frac{f}{s_i}) - \frac{\partial t}{\partial s_i} - k = 0 \quad (2.17)$$

Nous définissons maintenant un opérateur de fonctions de réaction dans cet ensemble L . Soit donc T^* l'opérateur associant à une paire de fonctions (f, t) une fonction de réaction pour chaque agriculteur et la surface totale mise en culture en résultant :

$$T^* \quad L \longrightarrow C^1((R^+)^3 \rightarrow R^+) * C^1((R^+)^n * R^+ \rightarrow R^+)$$

$$(f, t)(s_i, S, V) \longmapsto s_{f,t}^*(a_i, S, V), \quad S_{f,t}((a_i)_{i \in I}, V)$$

tel que :

$$\begin{cases} \forall i \in I \quad s_{f,t}^*(a_i, S, V) = \text{Arg Max}_{s_i} s_i [a_i r(\frac{f(s_i, S, V)}{s_i}) - k] - t(s_i, S, V) \\ S_{f,t}((a_i)_{i \in I}, V) = \sum s_{f,t}^*(a_i, S, V) = S \end{cases} \quad (2.18)$$

Existence et unicité de l'image par l'opérateur T^*

$[0, s_m]^n$ est un compact convexe de R^n . Soit $b(s_1..s_n)$ de $[0, s_m]^n$ dans $[0, s_m]^n$ avec pour chaque composante :

$$b_i(s_1..s_n) = \text{Arg Max}_{s_i} s_i [a_i r(\frac{f(s_i, \sum s_i, V)}{s_i}) - k] - t(s_i, \sum s_i, V)$$

La condition de premier ordre est nécessaire et suffisante et b est continue. Par conséquent, le théorème de Brouwer peut être appliqué (Aubin, 1997) et il existe $(s_1^*..s_n^*)$ tel que $(s_1^*..s_n^*) = b(s_1^*..s_n^*)$. De plus, si on différencie la relation de définition (2.17) pour s et S , on obtient :

$$\frac{ds}{dS} = - \frac{(\frac{\partial f}{\partial s} - \frac{f}{s})(\frac{\partial f}{\partial s} + \frac{\partial}{\partial s}(\frac{f}{s})) a_i r'' - \frac{\partial^2 t}{\partial s \partial S} + 2 \frac{\partial^2 f}{\partial s \partial S} a_i r' - \frac{\partial^2 t}{\partial s^2}}{(\frac{\partial f}{\partial s} - \frac{f}{s}) \frac{\partial}{\partial s}(\frac{f}{s}) a_i r'' - \frac{\partial^2 t}{\partial s \partial S} + \frac{\partial^2 f}{\partial s \partial S} a_i r' - \frac{\partial^2 t}{\partial s^2}} \quad (2.19)$$

En ce qui concerne l'unicité, une condition suffisante est que $\forall i \in I, s_i^*(a_i, S, V)$ soit décroissante en S , ce qui, avec (2.19), est vrai dans l'ensemble L' défini dans la partie principale de ce chapitre. La fonction $h(S) = \sum_{i \in I} s_i^*(a_i, S, V)$ est donc décroissante et il existe au maximum un point tel que $h(S) = S$.

Les conditions définissant l'ensemble L' nous semblent acceptables (voir partie principale du chapitre) : nous travaillerons désormais dans l'ensemble L' défini dans la partie principale du chapitre. Le programme du Gestionnaire est donc :

$$\begin{aligned} \underset{(f,t) \in L'}{Max} \quad & \sum_{\substack{i \in I \\ \text{tel que } \sum_{i \in I} f(s_{f,t}^*(a_i, S, V), S, V) = V \quad \text{et} \quad \sum_{i \in I} t(s_{f,t}^*(a_i, S, V), S, V) \geq 0}} \left[s_{f,t}^*(S, V) \left[a_i r \left(\frac{f(s_{f,t}^*(a_i, S, V), S, V)}{S_{f,t}((a_i)_{i \in I}, V)} \right) - k \right] - t(s_{f,t}^*(a_i, S, V), S, V) \right] \end{aligned} \quad (2.20)$$

L'ensemble des contraintes de (2.20) est convexe donc, à l'optimum, il est nécessaire et suffisant que les conditions de premier ordre soient nulles. Soient λ et μ les multiplieurs de Lagrange associés aux contraintes du programme (2.20). Soit $(df, dt) \in L'$ alors, en simplifiant les notations :

$$\begin{aligned} \Lambda(f + df, t) &= \sum_{i \in I} \left[s_{f+df, t}^*(a_i) \left[a_i r \left(\frac{(f + df)(s_{f+df, t}^*(a_i), a_i)}{s_{f+df, t}^*(a_i)} \right) - k \right] - t(s_{f+df, t}^*(a_i), a_i) \right] \\ &\quad + \lambda \left(\sum_{i \in I} (f + df)(s_{f+df, t}^*(a_i), a_i) - V \right) + \mu \left(\sum_{i \in I} t(s_{f+df, t}^*(a_i), a_i) \right) \end{aligned}$$

D'abord, une faible modification de la valeur de l'opérateur $T_{f+df, t}^*$ en différenciant la relation (2.17) donne :

$$ds_{f+df, t}^* = \frac{-s^3}{f^2 a_i r''} \left[\frac{\partial df}{\partial s} a_i r' \left(\frac{f}{s} \right) + \left(\frac{\partial f}{\partial s} - \frac{f}{s} \right) \frac{df}{s} a_i r'' \left(\frac{f}{s} \right) \right]$$

Nous considérons ici que la surface totale S n'est pas modifiée par un changement unilatéral de s_i du fait du grand nombre d'agriculteurs. Si nous prenons en compte cette modification, il y aurait juste un terme de plus dans le calcul et les résultats ne seraient pas changés. Par conséquent :

$$\frac{\partial \Lambda}{\partial f} df = \sum_{i \in I} ds(a_i r - k) + s \left(\frac{df + ds \frac{\partial f}{\partial s}}{s} - \frac{ds \cdot f}{s^2} \right) a_i r' - ds \frac{\partial t}{\partial s} + \lambda \frac{\partial f}{\partial s} ds + \lambda df + \mu \frac{\partial t}{\partial s} ds = 0$$

$$0 = \sum_{i \in I} \left(a_i r - k + (a_i r' + \lambda) \frac{\partial f}{\partial s} - \frac{f}{s} a_i r' + (\mu - 1) \frac{\partial t}{\partial s} \right) \frac{-s^3}{f^2 a_i r''} \left[\frac{\partial df}{\partial s} a_i r' + \left(\frac{\partial f}{\partial s} - \frac{f}{s} \right) \frac{df}{s} a_i r'' \right] + (a_i r' + \lambda) df$$

Par ailleurs, pour une variation de t :

$$\begin{aligned} \Lambda(f, t + dt) &= \sum_{i \in I} \left[s_{f, t+dt}^*(a_i) \left[a_i r \left(\frac{f(s_{f, t+dt}^*(a_i), a_i)}{s_{f, t+dt}^*(a_i)} \right) - k \right] - (t + dt)(s_{f, t+dt}^*(a_i), a_i) \right] \\ &\quad + \lambda \sum_{i \in I} (f(s_{f, t+dt}^*(a_i), a_i) - V) + \mu \sum_{i \in I} (t(s_{f, t+dt}^*(a_i), a_i)) \end{aligned}$$

Une petite variation $T_{f, t+dt}^*$ donne de la même manière :

$$ds_{f, t+dt}^* = \frac{-s^3}{f^2 a_i r''} \left[\frac{\partial dt}{\partial s} \right]$$

donc

$$\frac{\partial \Lambda}{\partial t} dt = 0 = \sum_{i \in I} \left(a_i r - k + (a_i r' + \lambda) \frac{\partial f}{\partial s} - \frac{f}{s} a_i r' + (1 - \mu) \frac{\partial t}{\partial s} \right) \frac{-s^3}{f^2 a_i r''} \left[\frac{\partial dt}{\partial s} \right] + (1 - \mu) dt$$

A l'optimum $f^*, t^*, \frac{\partial dt}{\partial s}, dt, \frac{\partial df}{\partial s}, df$ sont quelconques, donc les conditions de premier ordre sont :

$$\begin{cases} \forall i \in I & a_i r - k + (a_i r' + \lambda) \frac{\partial f}{\partial s} - \frac{f}{s} a_i r' = 0 \\ & \forall i \in I & a_i r' + \lambda = 0 \\ & \mu = 1 \end{cases} \quad (2.21)$$

La deuxième condition de (2.21) correspond à l'allocation optimale entre agriculteurs telle que définie précédemment.

Par conséquent $a_i r'(\frac{f(s_i^*, S, V)}{s_i^*}) = -\lambda$ est constant sur I . Puisque r' est inversible : $v(a_i) = (r')^{-1}(-\frac{\lambda}{a_i})$ est le volume apporté à l'hectare. On obtient :

$$\forall i \in I \quad a_i r(v(a_i)) - k - v(a_i) r'(v(a_i)) = 0$$

Soit $g(u) = r(u) - u r'(u)$. Cette fonction est strictement croissante et donc inversible et

$$\forall a_i \in R^+ \quad v(a_i) = g^{-1}(\frac{k}{a_i}).$$

Il vient, avec la définition de l'opérateur (2.17) et avec (2.21) : $\frac{\partial}{\partial s}(\frac{f}{s}) = 0$ et $\frac{\partial t}{\partial s} = a_i r(g^{-1}(\frac{k}{a_i})) - k$. On obtient :

$$t(s_i) = s_i \cdot \left[a_i r(g^{-1}(\frac{k}{a_i})) - k \right] = s_i \cdot g^{-1}(\frac{k}{a_i}) a_i r'(g^{-1}(\frac{k}{a_i})) \quad (2.22)$$

Par conséquent, la première équation de (2.21) correspond, elle, à l'allocation optimale au sein d'une exploitation donnée. Enfin, la troisième équation de (2.21) correspond à la saturation de la contrainte budgétaire : on ne brûle pas d'argent ici.

On obtient une description à la fois de f et de t qui dépend explicitement de la valeur des a_i : il n'est pas possible de trouver des fonctions réalisant cet optimum.

Optimalité du marché

Supposons un marché entre les agriculteurs. Ils échangent des volumes d'eau au prix unitaire p et le programme individuel est alors :

$$\underset{s_i \leq s_m}{Max} \pi_i = s_i \left[a_i r\left(\frac{V_i}{s_i}\right) - k \right] - p V_i$$

Au premier ordre en s_i :

$$a_i r'\left(\frac{V_i}{s_i}\right) = p$$

Au premier ordre en V_i :

$$\frac{\partial \pi_i}{\partial s} = a_i r\left(\frac{V_i}{s_i}\right) - a_i \frac{V_i}{s_i} r'\left(\frac{V_i}{s_i}\right) = k + \mu_i$$

On retrouve respectivement les équations (2.15) et (2.16). Si on ajoute la contrainte totale sur le volume, la résolution est identique à celle effectuée pour l'allocation optimale : on retrouve l'optimum de valorisation de l'eau.

De plus, le prix p est le multiplicateur de Lagranges λ de l'allocation optimale.

Annexe 2-3 Mécanisme de révélation

On cherche à mettre en œuvre une allocation en volume $f = s_i r'^{-1}(\frac{\lambda}{a_i})$.
Le profit de l'agriculteur i , de caractéristique a_i et qui annonce \tilde{a}_i est :

$$\pi(a_i, \tilde{a}_i) = s_i \left(a_i r'(r'^{-1}(\frac{\lambda}{\tilde{a}_i})) - k \right) - t(\tilde{a}_i, s_i, S, V)$$

De plus :

$$\pi(a_i, \tilde{a}_i) = \pi(\tilde{a}_i, \tilde{a}_i) + (a_i - \tilde{a}_i) s_i r'(r'^{-1}(\frac{\lambda}{\tilde{a}_i}))$$

Par définition, il faut que :

$$\forall a_i, \quad \forall \tilde{a}_i \quad \pi(a_i, \tilde{a}_i) \leq \pi(a_i, a_i)$$

D'où :

$$\pi(\tilde{a}_i, \tilde{a}_i) - \pi(a_i, a_i) \leq (\tilde{a}_i - a_i) s_i r'(r'^{-1}(\frac{\lambda}{\tilde{a}_i}))$$

Cette relation est vraie aussi en échangeant les valeurs de a_i et \tilde{a}_i , d'où :

$$(\tilde{a}_i - a_i) s_i r'(r'^{-1}(\frac{\lambda}{a_i})) \leq \pi(\tilde{a}_i, \tilde{a}_i) - \pi(a_i, a_i) \leq (\tilde{a}_i - a_i) s_i r'(r'^{-1}(\frac{\lambda}{\tilde{a}_i}))$$

Posons $\varphi(a_i) = \pi(a_i, a_i)$, alors si φ est dérivable, $\varphi'(a_i) = r(r'^{-1}(\frac{\lambda}{a_i}))$ et :

$$\varphi(\tilde{a}_i) = s_i \int_{a_i}^{\tilde{a}_i} r(r'^{-1}(\frac{\lambda}{u})) h(u) du + C$$

où C est une constante. D'où :

$$\pi(a_i, \tilde{a}_i) = s_i \int_{a_i}^{\tilde{a}_i} r(u) h(u) du + C$$

D'autre part, la contrainte de participation implique que tous les agriculteurs avec un coefficient meilleur que l'agriculteur pivot q ont un profit positif, soit :

$$\varphi(a_q) = C \geq 0$$

Réciproquement, prenons $C = 0$ et vérifions les contraintes d'incitation et de participation.

Condition d'incitation

Le profit d'un agriculteur de capacité à valoriser l'eau a_i et qui annonce \tilde{a}_i est :

$$\begin{aligned} \pi(a_i, \tilde{a}_i) &= s_i \left(a_i r'((r')^{-1}(\frac{\lambda}{\tilde{a}_i})) - k \right) - s_i \left(\tilde{a}_i r'((r')^{-1}(\frac{\lambda}{\tilde{a}_i})) - \int_{a_q}^{\tilde{a}_i} r'((r')^{-1}(\frac{\lambda}{u})) h(u) du \right) \\ &= \pi(a_i, a_i) + s_i \left[\int_{a_i}^{\tilde{a}_i} r'((r')^{-1}(\frac{\lambda}{u})) h(u) du - (\tilde{a}_i - a_i) r'((r')^{-1}(\frac{\lambda}{\tilde{a}_i})) \right] \\ &= \pi(a_i, a_i) + s_i \int_{a_i}^{\tilde{a}_i} \left(r'((r')^{-1}(\frac{\lambda}{u})) - r'((r')^{-1}(\frac{\lambda}{\tilde{a}_i})) \right) h(u) du \end{aligned}$$

La fonction $r((r')^{-1}(\frac{\lambda}{u}))$ est croissante en u donc $\pi(a_i, \tilde{a}_i) \leq \pi(a_i, a_i)$.

Contrainte de rationalité

Le profit est une fonction croissante de a_i et $\pi(a_q) = 0$: chaque agriculteur de coefficient meilleur que celui de l'agriculteur pivot q mettra tout en culture.

On montre aussi que la fonction $t(a_i)$ est une fonction croissante de a_i :

$$\frac{\partial t}{\partial a_i} = s_i \left[r(r')^{-1}(\frac{\lambda}{a_i}) + a_i \frac{-\lambda}{a_i^2} ((r')^{-1})'(\frac{\lambda}{a_i}) r'(r')^{-1}(\frac{\lambda}{a_i}) - r(r')^{-1}(\frac{\lambda}{a_i}) \right]$$

Or le terme $((r')^{-1})'$ est négatif donc $\frac{\partial t}{\partial a_i} \geq 0$. De même, V est une fonction croissante de a_i , ce qui justifie la forme de la courbe dessinée sur la figure (2.1).

Annexe 2-4 Esquisse de démonstration du principe de taxation

Une description simplifiée de ce principe est la suivante (on reprend de façon simplifiée la démonstration faite dans Guesnerie, 1995). On suppose qu'un Principal se trouve face à n agents de caractéristique individuelle $\theta \in \Theta$ inconnue du Principal. Ces agents ont une utilité $u(c, l, \theta)$ qui dépend de leur travail $l = (l_1, l_2)$ (on suppose que l'input travail peut prendre deux formes possibles) et de leur consommation c . Le Principal cherche, par exemple, à maximiser $\int u(c, l, \theta) d\mu$, où μ est la fonction de densité sur Θ , sachant que le travail permettant la consommation, il doit équilibrer les deux, i.e. $\int c(\theta) d\mu \leq \int l(\theta) d\mu$.

Un mécanisme de révélation est un mécanisme direct (les agents annoncent leur caractéristique) et révélateur (ils ont intérêt à dire la vérité) et de plus il conduit à une production Pareto-efficace. Cette dernière propriété est nécessaire pour démontrer l'équivalence (voir *infra*).

Supposons qu'un mécanisme de révélation soit mis en œuvre : chaque agent annonce au Principal sa caractéristique individuelle (par définition, le mécanisme de révélation est construit de sorte que tout agent a intérêt à déclarer son vrai niveau individuel). En fonction de cette déclaration, le Principal va appliquer les fonctions $l(\theta)$ et $c(\theta)$ qu'il aura annoncées initialement (fig. 2.9).

Montrons d'abord qu'à toute taxe $\psi(l)$ on peut associer un mécanisme de révélation qui aboutit à la même allocation.

Pour une taxe ψ donnée, les agents résolvent le programme suivant.

$$\max_{c \leq \psi(l)} u(c, l, \theta) \tag{2.23}$$

Ce programme permet de définir une fonction $\theta \longrightarrow c_\psi(\theta), l_\psi(\theta)$, à partir de laquelle le Principal peut définir un mécanisme direct. Les agents ont alors intérêt à annoncer leur vrai type. En effet, si ce n'est pas le cas, alors il existe θ et $\hat{\theta}$ tels que $c_\psi(\hat{\theta}), l_\psi(\hat{\theta})$ est meilleur pour l'agent θ que $c_\psi(\theta), l_\psi(\theta)$. Mais alors, puisque $c_\psi(\hat{\theta}), l_\psi(\hat{\theta})$ est atteint par l'agent $\hat{\theta}$, c'est que cette allocation vérifie $c \leq \psi(l)$, et donc que c'est ce couple qui aurait dû être le résultat du programme (2.23), ce qui contredit l'hypothèse initiale.

Montrons ensuite qu'à tout mécanisme de révélation on peut associer une taxe qui aboutit à la même allocation.

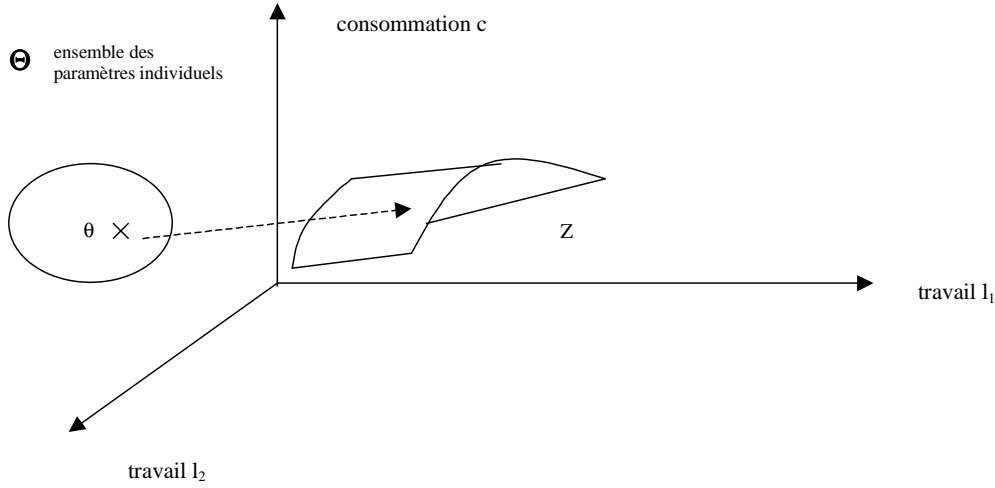


FIG. 2.9 – mécanisme de révélation

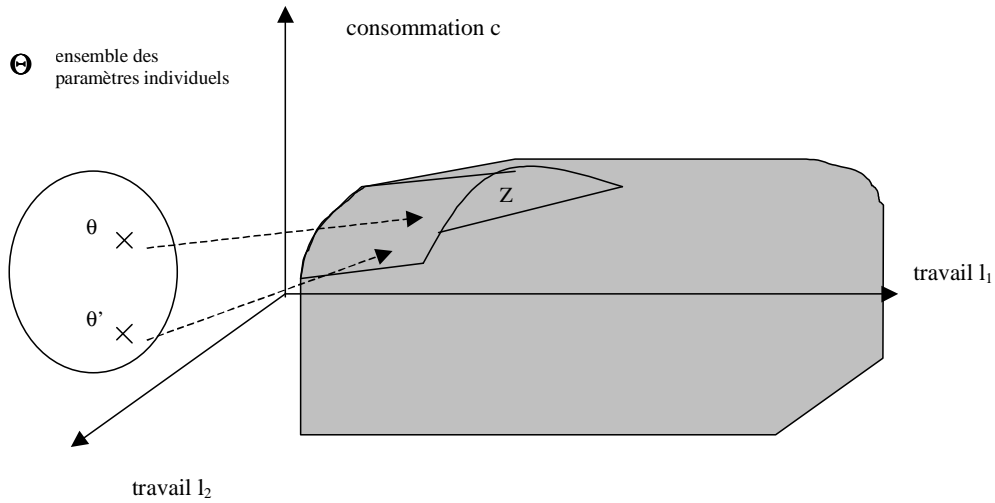


FIG. 2.10 – taxe associée au mécanisme de révélation

Soit donc un mécanisme de révélation qui définit une surface Z dans l'espace l, c (fig. 2.10). On définit la fonction ψ comme la frontière supérieure de l'ensemble $Z - R_+^3$, i.e. la zone en grisée sur la figure 2.10 : cette zone en grisé définit l'ensemble des allocations (l, c) vérifiant la contrainte budgétaire $c \leq \psi(l)$. Supposons que, pour un θ donné, le programme (2.23) aboutisse à un couple (l', c') différent du couple (l, c) issu du mécanisme de révélation. Alors, (l', c') appartient à Z car sinon le mécanisme de révélation n'est pas efficace pour la production du bien c (le mécanisme identique au mécanisme initial à la seule différence qu'il envoie θ sur (l', c') au lieu de (l, c) conduirait à une stricte amélioration de la production).

Il existe donc θ' dont l'allocation par le mécanisme de révélation est (l', c') . Par conséquent l'agent θ aura eu plus intérêt à mentir et à annoncer θ' plutôt que de révéler son vrai type, ce qui contredit l'hypothèse d'un mécanisme de révélation.

Annexe 2-5 Allocations *ex post* avec et sans mutualisation des profits

Allocation *ex post* sans mutualisation du profit

Soit $z(x) = a_x r(\frac{V}{xs_m}) - k - w$ une fonction décroissante en x . La surface totale mise en culture est donnée par l'indice de seuil $p(w)$ tel que : $z(p(w)) = 0$. Supposons que $w < v_q a_q r'(v_q)$, où q est l'agriculteur pivot pour l'allocation optimale. Puisque le volume par hectare décroît en i pour l'allocation optimale : $\frac{V}{qs_m} > v_q$. Donc :

$$z(q) > a_q r(v_q) - k - w = v_q r'(v_q) - w > 0$$

Par conséquent $p > q$ et il y a au moins un surasselement pour $w < v_q a_q r'(v_q)$.

De plus, la valorisation totale est : $W_{\text{expost}} = s_m \sum_1^{p(w)} (a_i r(\frac{V}{ps_m}) - k)$

Par conséquent, à l'optimum :

$$\frac{dW_{\text{expost}}}{dw} = \frac{dw}{dp} s_m \left[\sum_1^{p_{\text{opt}}} \left(a_i \frac{-V}{p_{\text{opt}}^2 s_m} r'(\frac{V}{p_{\text{opt}} s_m}) \right) + \left(a_{p_{\text{opt}}} r(\frac{V}{p_{\text{opt}} s_m}) - k \right) \right] = 0 \quad (2.24)$$

Cette relation donne l'équation de définition de la partie principale du chapitre.

Allocation *ex post* avec mutualisation des revenus

D'après la description des trois groupes d'agriculteurs faite dans la partie principale du chapitre, la surface totale mise en culture est :

$$S(\theta) = \frac{1}{2\theta} \sum_{i=1}^{o(\theta)} \frac{1}{a_i r(\frac{V}{S}) - k} + s_m (m(\theta) - o(\theta)) \quad (2.25)$$

On remarque que $S(\theta) < s_m m$, donc $m > p(0)$, l'agriculteur pivot pour la règle d'allocation *ex post* sans taxe. D'autre part, puisque l'ensemble des cotisations s'annulent, la valorisation totale est :

$$W_{\text{mut}} = \frac{o(\theta)}{2\theta} + s_m \sum_{o(\theta)}^{m(\theta)} \left(a_i r(\frac{V}{S(\theta)}) - k \right)$$

Si on cherche le θ optimal :

$$\frac{\partial \Pi}{\partial \theta} = -\frac{o(\theta)}{\theta^2} + s_m \sum_{o(\theta)}^{m(\theta)} a_i \frac{-V}{S^2} r'(\frac{V}{S}) \frac{dS}{d\theta} = 0$$

On obtient ainsi la relation caractérisant S à θ optimal donné :

$$\frac{o(\theta)}{\theta^2} = s_m \frac{-V}{S^2} r'(\frac{V}{S}) \frac{dS}{d\theta} \sum_{o(\theta)}^{m(\theta)} a_i$$

On obtient bien une fonction $S^*(\theta)$, la dérivée $\frac{dS}{d\theta}$ étant calculée à partir de l'équation (2.25).

Annexe 2-6 Calculs avec une fonction de forme racine carrée

Pour un agent seul : $v^* = g^{-1}(\frac{k}{a}) = 4\frac{k^2}{a^2}$ d'où $r(v^*) = 2\frac{k}{a}$ et $\Pi = \frac{V}{n4\frac{k^2}{a^2}}(2k - k) = \frac{Va^2}{4k}$.

Allocation optimale

Avec la forme donnée de la fonction de production $(r')^{-1}(u) = \frac{1}{4u^2}$ donc :

$$V = s_m \sum_{i=1}^q \frac{a_i^2}{4\lambda^2} = \frac{s_m}{4\lambda^2} \frac{q^{1-2\alpha}}{(1-2\alpha)}$$

De plus, compte-tenu de la définition de l'agriculteur pivot q et avec $g((r')^{-1})(u) = \frac{1}{4u}$: $\frac{a_q^2}{4\lambda} = k$ ce qui, mis dans l'équation précédente, donne :

$$q^{2\alpha+1} = \frac{V(1-2\alpha)}{4k^2 s_m}$$

Le profit total est alors :

$$\Pi_{opt} = s_m k \sum_{i=1}^q (2\frac{a_i^2}{a_q^2} - 1) = \frac{a_q^2 V}{2} - s_m q k$$

Allocation *ex ante*

Ici $s_i = \frac{V}{ng^{-1}(\frac{k}{a_i})} = \frac{Va_i^2}{4nk^2}$, so $S = \frac{V}{4nk^2} \sum a_i^2 = \frac{V}{4k^2 n^{2\alpha}(1-2\alpha)}$ et $r(g^{-1}(\frac{k}{a_i})) = 2\frac{k}{a_i}$. Il vient :

$$\Pi_{exante} = \sum_{i=1}^n \frac{V}{n \cdot \frac{4k^2}{a_i^2}} (2k - k) = \frac{V}{4kn} \sum_{i=1}^n a_i^2 = \frac{V}{4kn^{2\alpha}(1-2\alpha)}$$

TAB. 2.2 – résultats principaux pour les différentes allocations, à El Melalsa

Type d'allocation	Agriculteur pivot	Valorisation totale	Approximation de la valorisation totale pour un groupe homogène
Optimale	$q = \left[\frac{V(1-2\alpha)}{4k^2 s_m} \right]^{\frac{1}{1+2\alpha}}$	$s_m k^{\frac{1+2\alpha}{1-2\alpha}} \left[\frac{V(1-2\alpha)}{4k^2 s_m} \right]^{\frac{1}{1+2\alpha}}$	$\frac{V}{4k} (1 + 2\alpha(1 - \ln(\frac{V}{4k^2 s_m})))$
<i>Ex ante</i>	non	$\frac{V}{4kn^{2\alpha}(1-2\alpha)}$	$\frac{V}{4k^2} (1 + 2\alpha(1 - \ln(n)))$
<i>Ex post</i> sans taxe	$p = \left[\frac{V}{k^2 s_m} \right]^{\frac{1}{2\alpha+1}}$	$s_m k^{\frac{\alpha}{1-\alpha}} \left[\frac{V}{k^2 s_m} \right]^{\frac{1}{2\alpha+1}}$	$\alpha \frac{V}{k}$
<i>Ex post</i> avec taxe au volume optimale	$\left[\frac{V}{k^2 s_m} \frac{1-2\alpha}{2(1-\alpha)} \right]^{\frac{1}{1+2\alpha}}$	$s_m \left(\sqrt{\frac{V}{s_m} \frac{p_{opt}^{\frac{1}{2}-\alpha}}{1-\alpha}} - k p_{opt} \right)$	$\frac{V}{2k} ((\sqrt{2}-1)(1-2\alpha \ln(\frac{V}{2k^2 s_m})) - \frac{\alpha}{2})$
<i>Ex post</i> et mutualisation des revenus	non	pas de formule explicite	$\frac{V}{4k} (1 - 2\alpha(\ln(n) - 1))$
Mixte entre <i>ex ante</i> et <i>ex post</i>	$l = \left(\frac{(1-\beta)V}{k^2 S} \right)^{\frac{1}{2\alpha}}$	voir (2.27)	pas de formule explicite

Allocation *ex post* sans mutualisation des profits

L'agriculteur pivot p est défini par $r(\frac{V}{p.s_m}) = \frac{k+w}{a_p}$. On obtient $p(w) = \left[\frac{V}{((k+w)^2 s_m)} \right]^{\frac{1}{2\alpha+1}}$.

Quant à la valorisation totale : $V_{expost} = s_m k \sum_{a_p}^p (\frac{a_i}{a_p} - 1) = s_m k p \frac{\alpha}{1-\alpha}$.

L'équation (2.9) peut être réécrite selon :

$$p_{opt}^{-\alpha} \sqrt{\frac{V}{s_m} \frac{1}{p_{opt}}} - \sqrt{\frac{V}{s_m} \frac{1}{2}} \sqrt{p_{opt} \frac{p_{opt}^{-1-\alpha}}{1-\alpha}} = k$$

Donc : $p_{opt} = \left[\frac{V}{k^2 s_m} \frac{1-2\alpha}{2(1-\alpha)} \right]^{\frac{1}{1+2\alpha}}$

La valorisation totale avec une taxe optimale est finalement :

$$W_{expost \quad opt} = s_m \left(\sqrt{\frac{V}{s_m} \frac{p^{\frac{1}{2}-\alpha}}{1-\alpha}} - k p \right)$$

Allocation mixte entre *ex ante* et *ex post*

Posons :

$$f = \beta \frac{V}{n} + \frac{(1-\beta)V s_i}{S} = m + \frac{e}{2} s_i \text{ avec } m = \frac{\beta V}{n} \text{ et } e = \frac{2(1-\beta)V}{S} \quad (2.26)$$

Le premier ordre de (2.11) est alors : $0 = a_i \frac{m+es_i}{2\sqrt{ms_i+\frac{e}{2}s_i^2}} - k$ donc :

$$(e^2 - 2 \left(\frac{k}{a_i}\right)^2 e) s_i^2 + m(2e - 4 \left(\frac{k}{a_i}\right)^2) s_i + m^2 = 0$$

Le discriminant Δ a le signe de $2\frac{k^2}{a_i^2}$ par conséquent :

- pour $i < l = \left(\frac{(1-\beta)V}{k^2 S}\right)^{\frac{1}{2a}}$, $s = s_m$;
- pour $i \geq l$,

$$s_i^* = \frac{\delta m - \sqrt{m^2 \delta (\delta + 2e)}}{-\delta e} = \frac{\beta S}{2n(1-\beta)} \left(\sqrt{\frac{k^2}{k^2 - a_i^2 \frac{(1-\beta)V}{S}}} - 1 \right)$$

La surface S est calculée par :

$$S = s_m \left(\frac{(1-\beta)V}{k^2 S} \right)^{\frac{1}{2a}} + \frac{\beta S}{2n(1-\beta)} \sum_{i=l}^n \left(\sqrt{\frac{k^2}{k^2 - a_i^2 \frac{(1-\beta)V}{S}}} - 1 \right)$$

Et la valorisation totale est :

$$W_m = \sum_{i=0}^l s_m(a_i \sqrt{\frac{\beta V}{n s_m} + \frac{(1-\beta)V}{S}} - k) + \sum_{i=i^*}^n \frac{\beta S}{2n(1-\beta)} s_l(a_i \sqrt{\frac{\beta V}{n s_i^*} + \frac{(1-\beta)V}{S}} - k) \quad (2.27)$$

Annexe 2-7 Le modèle de décisions d'assolement à El Melalsa

Les choix des agriculteurs sont simulés avec des modèles de programmation linéaire dans un contexte déterministe. Deux modèles légèrement différents sont construits pour les règles *ex post* et *ex ante*.

Nous considérons que le piment suivi par la fève constitue une seule culture. Parce que le prix réel de l'eau est élevé en fin de réseau et parce que les cultures se chevauchent, nous prenons en compte le fait que l'agriculteur peut délibérément décider de ne pas irriguer autant que nécessaire le blé et la fève. Nous considérons qu'il mettra toujours suffisamment peu de melon pour lui assurer une absence de stress. Pour les agriculteurs disposant d'eau hors du périmètre, nous estimons qu'il est toujours profitable d'irriguer correctement la fève hors du périmètre puisque le coût d'exhaure de l'eau de puits est moins élevé et, d'après nos observations de terrain, les agriculteurs peuvent toujours décider de ne pas irriguer leur blé suffisamment en cas de contraintes sur l'eau.

Les **caractéristiques de l'agriculteur** sont : sa surface dans (SAU) et hors ($SAUH$) du périmètre, le coefficient de perte moyen sur l'ensemble de ses parcelles a ($a = 1$ si il n'y a pas de pertes et a diminue lorsque les pertes augmentent), la main d'œuvre familiale (MO) et un éventuel volume journalier disponible hors du périmètre par un puits (Vjh).

Les **variables de décision** sont : les surfaces dans le périmètre en blé, piment-fève et melon (S_{ble} , S_{pfe} , S_{mel}), hors du périmètre (S_{bleh} , S_{pfeh} , S_{melh}), les volumes totaux affectés au blé en période 1 et 2 (V_{ble1} , V_{ble2}), au piment-fève (V_{pfe}), et de même hors du périmètre (V_{bleh1} , V_{bleh2}), et enfin la possibilité de louer de la main d'œuvre en mars ($Locmoms$) et en juin ($Locmojn$).

Les **contraintes communes aux deux modèles** sont :

- la limitation de surface dans le périmètre : $S_{ble} + S_{pfe} + S_{mel} \leq SAU$ et de même hors du périmètre $S_{bleh} + S_{pfeh} + S_{melh} \leq SAUH$;
- l'impossibilité de semer du melon sur la même parcelle plus d'une année sur trois : $S_{mel} \leq \frac{SAU}{3}$ et de même hors du périmètre ;
- la contrainte en main d'œuvre en mars et en juin ;
- l'obligation de semer du blé au moins une année sur trois : $S_{ble} \geq \frac{SAU}{3}$ et de même hors du périmètre.

La dernière contrainte correspond au fait que les agriculteurs cultivent du blé par tradition, avec une autoconsommation importante ; les agriculteurs cultivent aussi du blé pour limiter la prise de risque puisque, même si l'agriculteur décide de ne pas l'irriguer et de s'en remettre à la pluie, cette culture nécessite un faible investissement initial.

Lorsqu'un agriculteur pourra choisir le volume apporté à l'ensemble de la surface cultivée, on part de l'équation très approximative suivante :

$$r = r_m \left[1 - ky \left(1 - \frac{aV + s.pluie}{s\Sigma ETM} \right) \right]$$

où r est le rendement réel, r_m est le rendement maximal, ky le coefficient de stress hydrique, V le volume apporté et s la surface choisie. Enfin, ΣETM représente l'évapotranspiration maximale* totale sur la période de culture considérée. Si P est le prix de la culture, CV les charges variables, Pe le prix de l'eau alors le profit réalisé avec la culture est :

$$\begin{aligned} \pi &= (P.r - CV)s - PeV \\ &= \left(P.r_m \left[1 - ky \left(1 - \frac{pluie}{\Sigma ETM} \right) \right] - CV \right) s + \left(aP.r_m \cdot \frac{ky}{\Sigma ETM} - Pe \right) V \\ &= \alpha.s + (\alpha\beta - Pe).V \end{aligned}$$

avec $\alpha = P.r_m \left[1 - ky \left(1 - \frac{pluie}{\Sigma ETM} \right) - CV \right]$ et $\beta = P.r_m \cdot \frac{ky}{\Sigma ETM}$

Dans le cas du blé, nous utiliserons $r = r_m \left[1 - ky \left(1 - \frac{V_{ble1} + V_{ble2} + pluie}{s\Sigma ETM} \right) \right]$ soit une marge brute tirée de cette culture :

$$\pi_{ble} = (P.r_m(1 - ky(1 - \frac{pluie}{\Sigma ETM})) - CV)S_{ble} + (P.r_m \cdot \frac{ky}{\Sigma ETM} - Pe)V_{ble1} + (P.r_m \cdot \frac{ky}{\Sigma ETM} - Pe)V_{ble2}$$

De même, pour le melon : $\pi_{mel} = (P.r_m - CV)S_{mel} - Pe \cdot \frac{\Sigma ETM - pluie}{a}$

Il faut aussi vérifier qu'à chaque pas de temps le volume apporté est inférieur au besoin compte tenu des pertes :

$$\begin{cases} -\Sigma ETM.S_{pfe} + aV_{pfe} \leq pluie_{pfe} \\ -\Sigma ETM.S_{ble} + aV_{ble1} \leq pluie_1 \\ -\Sigma ETM.S_{ble} + aV_{ble2} \leq pluie_2 \end{cases}$$

Le melon nécessite 550 m³ en plus en début de période 2 car nous prenons en compte une irrigation de semis. Le prix de l'eau est de 0.041 DT/m³ dans le périmètre et le coût d'exhaure de l'eau d'un puits vaut 0.02 DT/m³. Enfin, les marges brutes hors du périmètre sont pour la fève de 1288 DT et pour le melon de 2663 DT. En ce qui concerne

TAB. 2.3 – principaux coefficients utilisés pour la simulation sur le GIC d'El Melalsa

Culture	Période	Ky	Récolte max. (T)	ETM totale (mm)	Pluie (mm)	Besoins totaux en irrigation (m ³)	Besoin d'irrigation par période (m ³)	Prix de la culture (DT/T)	Charges (DT/ha)	α	β	Revenu si la culture est suffisamment irriguée (DT/ha)
Blé	1	1.05	4	2770	900	4110	1870	285	200	81.42	0.43	1686
	2			2960	720		2240					
Piment fève		1	7	4059	1480	2579	1900	280	800	-85.34	0.43	1160
							0					
Melon	2		15	829	720	4650	1000	250	1000	2570		2570
	3			3900	250		3650					

la ressource collective, la pompe fonctionne 10 heures par jour du 1^{er} septembre au 15 mars et 20 heures pendant l'autre partie de l'année.

Lors des différentes simulations effectuées, le blé n'est jamais financièrement intéressant, il est donc cultivé à son niveau minimal, i.e. une surface totale de 43.35 ha ; c'est-à-dire que les autres cultures sont situées sur un segment $S_{mel} + S_{pfe} = 86.65$ ha.

Compléments pour la règle avec durée individuelle libre

Un logiciel de bilan hydrique, Bilhy, a été conçu sous Excel. Il permet, compte-tenu d'une règle donnée de distribution de l'eau, d'établir un bilan hydrique pour chaque champ et donc d'estimer les rendements liés à des stress hydriques (Lardilleux, 2000, voir aussi la méthode générale d'analyse en Annexe A p. 234). Ce logiciel utilise une année pluviométrique médiane à la fois pour les saisons d'hiver et d'été.

A un jour donné, les besoins en eau pour chaque plante sont satisfaits. Le tableur calcule le temps nécessaire pour irriguer selon les besoins des plantes toute la surface du périmètre en fonction du débit journalier : l'irrigation des surfaces n'est ensuite recommencée qu'au bout de cette durée. On recrée ainsi une évolution de la longueur du tour d'eau en fonction de la surface mise en culture et de la pluviométrie (fig. 2.11). Enfin, Bilhy calcule le rendement associé à chaque culture i par le biais de la formule suivante :

$$r = r_m \left[1 - ky_i \left(1 - \frac{\sum ETR}{\sum ETM} \right) \right]$$

Tous les agriculteurs du périmètre obtiendront ce rendement ; néanmoins, les agriculteurs prennent en compte les pertes sur le réseau lorsque, à un tour d'eau donné, ils irriguent de façon à remplir le réservoir sol. Les factures d'eau payées au GIC différeront donc suivant la place de l'agriculteur sur le réseau.

Nous avons aussi utilisé les éléments suivants.

- Le tour d'eau est au minimum d'une semaine.
- Les agriculteurs n'apportent que 50% du maximum entre le réservoir de surface et le réservoir racinaire pour le blé et le piment-fève, ceci pour prendre en compte le fait que, même si les agriculteurs ont des stratégies d'irrigation différentes, ils n'irriguent jamais le piment-fève et le blé au maximum de leurs besoins, comme le montrent les bilans hydriques effectués.

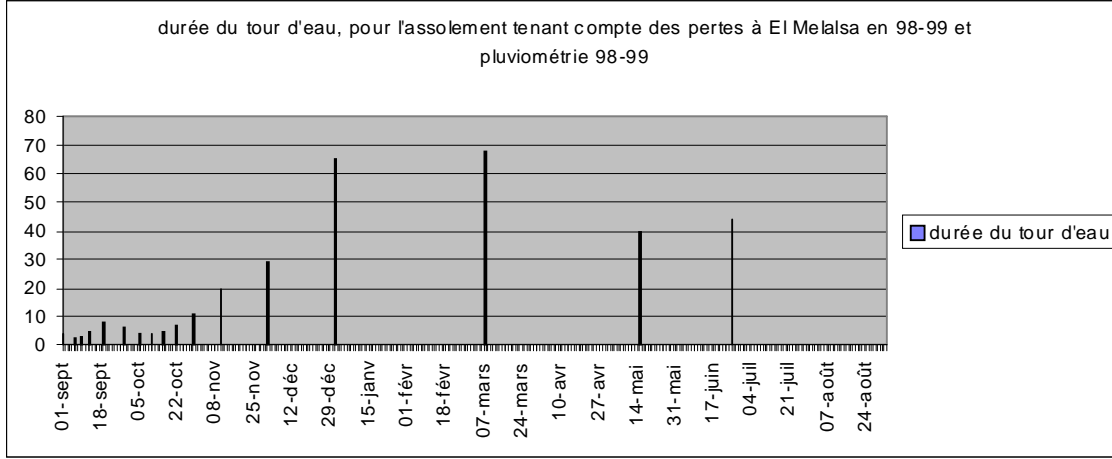


FIG. 2.11 – simulation de l'évolution de la longueur du tour d'eau pour la règle de durée individuelle d'irrigation libre avec assolement et pluie de l'année 98-99 pour El Melalsa

- Pour 130 ha mis en culture, le taux de perte moyen en prenant en compte les pannes chroniques de la pompe est de 50%.

Compléments pour la règle *ex ante*

Soit V_{j1} et V_{j2} les volumes quotidiennement délivrés par la pompe pendant les périodes 1 et 2. Soit aussi $V_{jh} = 346m^3$ le volume d'exhaure quotidien à partir d'un puits. Chaque agriculteur peut irriguer jusqu'à un volume de $V_j \cdot \frac{SAU}{\Sigma SAU}$ par jour. Par conséquent, avec $n_{per1} = 135$ et $n_{per2} = 46$ les durées respectives des périodes 1 et 2, les nouvelles contraintes sont en période 1 :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{ble1} + V_{pfe} \leq V_{j1} \cdot \frac{SAU}{\Sigma SAU} \cdot n_{per1} \\ \text{et à l'extérieur } 1870S_{pfe} + V_{bleh1} \leq V_{jh} n_{per1} \end{array} \right.$$

De la même façon, en période 2 :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\Sigma ETM - pluie}{a} S_{mel} + V_{ble2} \leq V_{j2} \cdot \frac{SAU}{\Sigma SAU} \cdot n_{per2} \\ \frac{\Sigma ETM - pluie}{a} S_{mel} + V_{bleh2} \leq V_{jh} \cdot n_{per2} \end{array} \right.$$

Compléments pour la règle *ex post* proportionnelle aux surfaces mises en culture

Chaque agriculteur reçoit pendant la période 2 un volume total proportionnel à la surface qu'il a mise en culture en melon S_{mel} , soit $V = n_{per2} \frac{S_{mel} V_j}{S_{totmel}}$ où V_j représente le volume quotidien délivré par la pompe, ici $1728 m^3/j$, et S_{totmel} la surface totale mise en culture en melon. Puisque le melon nécessite $1000 m^3$ pendant la période 2, l'équation représentant les besoins en melon pendant la période 2 devient alors : $1000.S_{mel} + V_{ble2} < \mu a.S_{mel}$ soit $(1000 - \mu a).S_{mel} + V_{ble2} < 0$.

Chapitre 3

Partager le risque par le biais de l'allocation en eau ?

“Avec les dérogations pour les interdictions de prélèvement, il y a eu une dérive. Certains agriculteurs irriguaient leurs cultures sous contrat les jours d'interdiction et le maïs les autres. Ces dérogations, ça sème la zizanie dans les campagnes.”

Un membre d'une Chambre d'Agriculture dans le bassin de l'Adour

Résumé du chapitre

Très souvent, la ressource en eau qui va être distribuée pendant la campagne d'irrigation est incertaine au moment des choix d'assolement. En plus des objectifs de valorisation et d'équité, la Collectivité peut alors chercher à partager le risque, à obtenir un niveau de risque global qui lui convient et à diminuer la variabilité inter-annuelle des revenus.

Dans le cas où les agriculteurs diffèrent par leur aversion au risque, les règles *ex ante* et *ex post* sont comparées à des marchés et à des mécanismes d'assurance extérieurs au système irrigué.

La règle d'allocation *ex post* permet à la fois de répartir le risque de façon optimale entre agriculteurs et de valoriser l'eau au mieux pour un assolement donné. Cependant, cette règle, comme tout mécanisme externe d'assurance, crée des opportunités de surassolement, notamment par les agriculteurs les moins averses au risque. Ce surassolement conduit à une prise de risque trop importante, mais qui peut néanmoins correspondre à une augmentation de la valorisation moyenne de l'eau.

Il apparaît qu'aucune règle ne permet, seule, de répondre à tous les objectifs que la Collectivité peut se donner. Le partage du risque peut néanmoins se faire de façon efficace par le biais de l'allocation de l'eau si le surassolement peut être limité par la Collectivité ou par des contraintes techniques.

L'incertitude sur le volume collectif disponible est un aspect majeur de la gestion de l'eau pour de nombreux systèmes irrigués dans le monde.

D'une part, beaucoup de systèmes ont été dimensionnés de façon à pouvoir atteindre un maximum d'agriculteurs, tel que dans le système *warabandi* (Jürriens et Mollinga, 1996). De même, sur l'Arros, un affluent de l'Adour, les agriculteurs ont négocié une baisse du quota garanti par hectare de façon à augmenter la superficie irrigable, augmentant ainsi les risques de défaillance globale.

Dans ces cas-là, le réseau suffisant à peine à irriguer les surfaces mises en culture, la moindre défaillance dans l'apport en eau a des conséquences importantes. Il y a 20 ans, la règle majoritairement utilisée par les ingénieurs lors de la construction de réseaux était l'assurance d'une ressource suffisante uniquement 4 années sur 5 (Livingstone et Hazlewood, 1979). Cette incertitude porte aussi souvent, de façon équivalente, sur la pluie en tant que complément d'une dotation en eau d'irrigation qui seule, ne suffit pas à satisfaire les besoins de la plante.

D'autre part, il devient de plus en plus difficile et coûteux de mobiliser de nouvelles ressources, et ce pour deux raisons principales :

- le coût de mobilisation des ressources est toujours croissant : on construit les barrages d'abord sur les sites les plus propices ;
- il y a de plus en plus d'opposition à la création de nouveaux barrages pour des objectifs de préservation de l'environnement.

Il faut mettre en place des mécanismes de gestion de la demande en situation d'incertitude. La formalisation de cette incertitude est un aspect important de la gestion de l'eau en France actuellement : le respect des débits environnementaux de référence comme les garanties de prélèvement sont désormais définis selon des bases statistiques explicites (Faÿsse, 1998).

En forçant le trait, on peut définir deux situations caractéristiques pour les pays du Nord et pour ceux du Sud.

Dans les pays du Sud, il n'existe pas de système d'assurance sécheresse formalisé. En Tunisie, actuellement, de nombreux agriculteurs au sein de périmètres irrigués n'ont pas de titres de propriété parce que ces derniers sont conditionnés à la réalisation d'un remboursement. Ces titres sont nécessaires pour l'obtention de crédits auprès de la Banque Nationale Agricole : les agriculteurs doivent donc s'autofinancer ou bien demander des crédits informels auprès d'amis. **Ce manque de partage de risque sur la sécheresse conduit souvent une sous-utilisation de la ressource en eau.** Il peut y avoir cependant un partage du risque par le biais de l'allocation de l'eau dans de petits périmètres. En Tunisie par exemple, après une panne du réseau, les cultures maraîchères sont prioritaires sur les céréales (Faÿsse, 2000).

Dans les pays du Nord, les systèmes d'assurance autour de la ressource en eau sont d'actualité pour plusieurs raisons. D'abord parce que les charges fixes devenant de plus en plus importantes, les agriculteurs ont besoin de stabiliser leur revenu. Hormis quelques risques tels que la grêle ou la tempête, en général l'Etat doit subventionner les primes d'assurance pour rendre viable la présence d'assurances privées. Ainsi, les Etats-Unis ont mis en œuvre depuis 1938 un programme de subvention à l'assurance rendement (C.E.S, 1998).

L'outil d'assurance agricole français, le Fonds National de Garantie pour les Calamités Agricoles (FNGCA), peut être utilisé suite à une sécheresse : il a ainsi affecté 55 % de

ses aides à des problèmes de sécheresse pendant la période 1987-1996 (C.E.S., 1998). Cependant, le FNGCA offre un faible niveau d'indemnisation et les versements des indemnités se font tardivement. Le Conseil Economique et Social estime que la France connaît un grand retard en matière d'assurance agricole : elle n'y consacre que 0.05 % de son budget dédié à l'agriculture contre de 15 à 35 % pour des pays tels que les Etats-Unis, le Canada, l'Espagne ou le Portugal (C.E.S., 1998).

De plus, en France, le système actuel de gestion de l'eau sur les rivières au débit non maîtrisé est considéré comme en échec parce qu'en cas de sécheresse, les agriculteurs réussissent à négocier un retard dans l'application des interdictions de prélèvement : le débit dédié à l'environnement subit la plus grande partie du déficit en eau. Pour la Collectivité, la surface totale actuellement mise en culture par les agriculteurs correspond alors à une trop grande prise de risque. Le Ministère de l'Environnement souhaite que cette assurance "de fait" par la ressource soit remplacée par une assurance extérieure au bassin versant.

Un contrôle direct des surfaces mises en culture permet évidemment de gérer la demande. Dans le périmètre de Tambaparani, en Inde, l'Office d'Irrigation décide ainsi de la surface irrigable totale pendant la saison Kar (juin à septembre). En fonction des niveaux d'eau dans les réservoirs, il autorise le semis d'une certaine surface dans les premiers canaux secondaires du réseau. Puis, en début juillet et en fin juillet, en fonction des niveaux de remplissage des réservoirs, il autorise l'irrigation de nouvelles surfaces irrigables par les secondaires en bout de réseau (Brewer et al., 1997). Sur le périmètre irrigué de la Begoña au Mexique, le Gestionnaire définit en début d'année une surface irrigable maximale par lot en fonction du volume d'eau présent dans la retenue. Ensuite, pendant la campagne d'irrigation, les agriculteurs peuvent irriguer autant qu'ils le souhaitent lorsqu'ils disposent de la main d'eau (Verdeil, 1993).

L'étude porte ici sur le cas fréquent où, en revanche, **les agriculteurs sont autonomes dans leur choix de surface. Ils possèdent les mêmes compétences techniques, i.e. la même fonction de production, mais diffèrent par leur aversion au risque : il y a un gain potentiel à partager d'un risque global sur la ressource en bien commun.**

Cette hétérogénéité dans l'aversion au risque peut avoir plusieurs origines. On peut d'abord faire l'hypothèse que les agents ont la même fonction d'utilité espérée mais des niveaux de richesse initiale différents. Il est alors fréquent de supposer que l'indice absolu d'aversion au risque décroît avec la richesse. De plus, les agents n'ont souvent pas les mêmes possibilités de se couvrir contre le risque, par les réseaux familiaux entre autres.

Enfin, même si les agriculteurs ne connaissent pas le volume qui sera collectivement disponible pendant la campagne d'irrigation, on fait l'hypothèse qu'ils connaissent les modalités d'application des règles d'allocation de l'eau, comme dans les chapitres précédents.

Lorsque l'agriculteur est seul, il va devoir arbitrer entre maximiser l'espérance du revenu et minimiser la variance de ce dernier. La collectivité constituée par les irrigants, elle, ne peut pas être considérée comme neutre au risque car elle fait face à un risque global sur le volume collectif disponible. Cette collectivité peut alors chercher à atteindre cinq objectifs :

- s'assurer d'une surface totale mise en culture correspondant à l'aversion collective au risque ;
- mettre en place un mécanisme de partage de risque ;
- valoriser l'eau au mieux à surface et volume collectifs donnés ;
- diminuer la variabilité inter-annuelle des revenus ;
- allouer l'eau de façon équitable.

Ces 5 objectifs seront détaillés par la suite : ils vont permettre de comparer différentes règles d'allocation existantes ou envisageables. De façon générale, la Collectivité aura à arbitrer entre une allocation rigide et des mécanismes de partage de risque qui débouchent souvent sur des comportements stratégiques de surassolement, notamment par les agriculteurs les moins averses au risque.

Questions du chapitre

En fonction des objectifs de la Collectivité (valorisation de l'eau, partage du risque, etc.), quelle règle d'allocation de l'eau choisir ?

Dans quelles conditions l'allocation de l'eau peut-elle être utilisée pour partager le risque entre irrigants ?

Quelles différences existe-t-il entre le partage du risque par l'allocation de l'eau et par une assurance extérieure au système irrigué ?

L'analyse économique du lien entre RBC et partage du risque

Les études antérieures sur l'assurance au sein de communautés ont porté sur le partage entre individus de risques non corrélés et subis, i.e. sans décision de prise de risque *ex ante*.

Un premier axe de cette littérature est la mesure de l'impact des réseaux informels de partage de risque au niveau des villages.

Certains auteurs essaient d'estimer économétriquement l'importance du partage de risques individuels au sein d'un village, en mesurant notamment la covariance de la consommation individuelle avec la consommation collective d'une part et avec le revenu individuel d'autre part. Townsend (1994) montre ainsi que, si l'hypothèse de partage de risque complet doit être rejetée dans une étude sur trois villages indiens, les mécanismes de dons/prêts permettent néanmoins aux villageois de plus diversifier leur assolement que s'ils étaient seuls. De plus, sur un cas d'étude dans les Philippines, le partage du risque par les réseaux familiaux est apparu comme plus important que celui au sein du village (Lund et Fafschamps, 1997). Ces auteurs caractérisent aussi la forme du partage de risque en montrant qu'il se fait plus par le biais de prêts sans intérêt que par le biais de dons. Ligon (1998) compare sur trois villages indiens l'application de modèles d'assurance : soit il n'y a pas de partage de risque, soit le partage de risque est complet et en information complète, soit enfin les agents peuvent prendre des actions privées et le mécanisme d'allocation doit prendre en compte la contrainte d'incitation qui en découle. Il montre que ce sont les prévisions du dernier modèle qui sont les plus proches des données obtenues.

Carter (1987) étudie le dilemme entre exploitation collective et individualisation des parcelles : d'un côté il existe une inefficacité due à l'aléa moral de sous-travail, tandis que de l'autre l'utilité des agriculteurs n'est pas optimale par manque de couverture des risques individuels non corrélés. Il montre qu'il existe alors un mécanisme intermédiaire entre les deux solutions qui est plus efficace que les deux règles initiales.

Enfin, Arnott et Stiglitz (1991) s'intéressent aux problèmes d'aléa moral lorsque, en plus du marché d'assurance habituel, les agents peuvent mettre en place entre eux des mutuelles hors du marché (solidarité au niveau de la famille, du village, etc.). Dans ce cadre, lorsque les personnes "solidaires" n'ont pas de meilleure information sur le niveau d'action de l'agent, non seulement cette mutuelle chasse l'assurance de marché, mais en plus, au final, l'utilité espérée de tous les agents est plus faible. En revanche, si les personnes solidaires ont une meilleure information, la mutuelle peut être bénéfique. Dans le cadre adopté pour ce chapitre, l'action prise par l'agent est effectivement bien mieux évaluée par les autres agriculteurs que par un assureur extérieur, mais le risque entre les agents est corrélé : on ne peut pas directement appliquer les conclusions de cet article.

Le deuxième axe de cette littérature est l'utilisation des RBC pour mutualiser des risques individuels.

Pour Nugent et Sanchez (1994), plus le risque est important, plus les agriculteurs doivent diversifier géographiquement leurs champs et, à partir d'un certain niveau d'incertitude, il devient plus facile pour les agriculteurs de gérer une ressource en bien commun plutôt que les conflits liés à de multiples propriétés imbriquées. Kimball (1988) estime que les paysans anglais au Moyen-Age auraient eu tout intérêt à se mettre en coopérative pour partager le risque non corrélé sur leurs récoltes : compte-tenu de leur aversion au risque et de leur taux de dépréciation pour le futur, ils n'auraient pas eu intérêt à quitter la coopérative lorsqu'ils deviennent, une année, des contributeurs nets. Enfin, Wilson et Thompson (1993) ont étudié les grandes collectivités de production agricoles mexicaines (*ejidos*) en milieu semi-aride : ils estiment que leur principal intérêt réside dans la possibilité laissée aux troupeaux d'évoluer sur une plus grande région en fonction de la localisation des pluies.

Ces études s'intéressent cependant au partage du risque entre des personnes supportant des risques peu voire pas du tout corrélés.

Par rapport à tous ces modèles, l'approche adoptée ici se distingue donc sur deux points importants :

- **le risque porte sur le volume collectif**, i.e. un risque global à l'échelle du village ;
- **les agriculteurs sont autonomes dans leur choix d'assolement**, c'est-à-dire leur prise de risque ; la somme de ces prises de risque individuelles constitue alors la prise de risque collective.

L'étude porte ici sur l'impact des règles sur les choix des agriculteurs et sur l'efficacité du partage du risque. Les difficultés techniques de mise en place de tels mécanismes ne seront pas examinées : elles font l'objet d'une abondante littérature, notamment les difficultés de mise en œuvre des marchés de l'eau. Par rapport à la littérature très large sur les mécanismes d'assurance agricole, l'objectif de ce travail est de comparer ces systèmes d'assurance externes avec la capacité des règles d'allocation de l'eau à mettre en place un partage du risque.

Le formalisme général est d'abord présenté, ainsi que les caractéristiques d'un partage optimal du risque (section 1). Puis, les différentes formes d'allocation sans assurance extérieure sont caractérisées : différentes allocations en volume ou marchés incomplets (section 2), puis les assurances extérieures au système irrigué envisageables (section 3). Toutes ces règles d'allocation sont comparées selon les critères définis initialement (section 4). Enfin, quelques uns de ces mécanismes sont étudiés dans le cas de l'Adour et de la Tunisie (section 5).

3.1 Un modèle et des critères d'évaluation

Le modèle utilisé se fonde sur celui du chapitre 1. Ici, le volume collectivement disponible est incertain et de densité de probabilité $h(V)$ supposée connue par tous les agriculteurs. Soit H un support pour cette fonction de densité. Par hypothèse, la tolérance absolue¹ T_i des agriculteurs vis-à-vis du risque est constante : soit parce que la fonction d'utilité est une exponentielle négative, soit parce qu'on fait l'hypothèse que les variations de profit sont faibles devant la richesse totale de l'agriculteur.

Par la suite, on suppose que la fonction de bien-être collectif est de la forme :

$$F \left[EU_1 \left(s_1 \left[r \left(\frac{V_1}{s_1} \right) - k \right] - t_1 \right), \dots, EU_n \left(s_n \left[r \left(\frac{V_n}{s_n} \right) - k \right] - t_n \right) \right] \quad (3.1)$$

3.1.1 Cas d'un agriculteur seul

On suppose que l'agriculteur maximise une fonction de la forme von Neumann Morgenstern de son profit, c'est-à-dire que d'une part, l'agent possède une fonction d'utilité pour les différents profits possibles $u(\pi)$. D'autre part, il va choisir un assolement s_i en maximisant l'utilité espérée de son profit $\pi(s_i)$, c'est-à-dire :

$$\max_{s_i} EU_i(s_i) = \int_{V_i} u(\pi_i(s_i)) h(V_i) dV_i \quad (3.2)$$

La fonction u est linéaire pour un agent neutre au risque et concave pour un agent averse au risque.

Proposition 1 *Pour un agriculteur seul, il existe une unique surface permettant de maximiser l'utilité espérée. De plus, plus un agriculteur est averse au risque, moins la surface qu'il mettra en culture irriguée est importante.*

Démonstration : voir annexe 3-1.

Cette proposition permet de définir une fonction $s = SO(h(V), T)$ qui associe une superficie optimale à fonction de probabilité sur V et tolérance absolue de l'individu données.

¹La tolérance absolue au risque est l'inverse de l'indice absolu d'aversion au risque, soit :
 $T_i(\pi) = \frac{1}{I_{ai}(\pi)} = \frac{-u'(\pi)}{u''(\pi)}.$

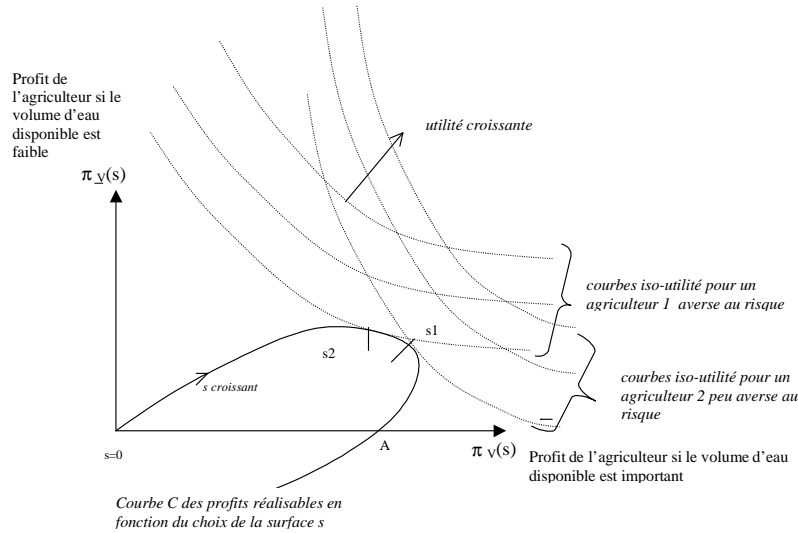


FIG. 3.1 – choix de surface d'un agriculteur avec deux volumes possibles

A titre d'exemple, supposons que le volume disponible pour un agriculteur ne puisse prendre que deux valeurs \bar{V} et \underline{V} : la figure (3.1) représente alors ce choix de superficie irriguée. Sur ce schéma, les axes représentent les profits qui seront réalisés si le volume dont l'agriculteur disposera est important (abscisse) ou faible (ordonnée). La courbe C, en trait continu, représente le lieu des profits possibles suivant le choix de la surface s mise en culture irriguée par l'agriculteur : lorsque s croît, cette courbe part bien sûr de l'origine pour $s = 0$, puis elle atteint le point A où le rendement fonction du volume à l'hectare dans le cas de l'événement "sécheresse" $r(\frac{V}{s})$ égale le coût fixe à l'hectare k . Le profit total correspondant est alors nul.

Les courbes en tiret représentent les courbes d'iso-utilité pour un agriculteur, et ce pour deux niveaux d'aversion au risque différents. Le choix de surface de l'agriculteur correspond au point sur la courbe C qui maximise l'utilité, i.e. qui tangente ces courbes d'iso-utilité : sur ce graphique, on obtient ainsi la surface $s1$ pour un agriculteur peu averse au risque et $s2$ pour un agriculteur averse au risque.

De plus, la surface choisie diminue avec l'augmentation de l'incertitude sur le volume. Perry et Narayanamurthy (1998) montrent ainsi que la conduite de l'irrigation avec un apport inférieur à l'évapotranspiration maximale est à la fois économiquement intéressante et risquée car en dessous d'un certain seuil d'apport en eau, le profit chute brutalement. Ils vérifient, dans le cas du système *warabandi*, que les agriculteurs pratiquent largement cette irrigation en déficit mais aussi que plus la distribution de l'eau est aléatoire, plus les agriculteurs réduisent leur surface de façon à se prémunir contre le risque de passer en-dessous de ce seuil. En Tunisie, le coût de l'eau d'irrigation dans les périmètres irrigués représente une part importante des charges : à El Melalsa, les agriculteurs en bout de réseau, qui paient donc l'eau beaucoup plus cher, prennent souvent des risques sur la pluviométrie de l'hiver. Ainsi, au printemps 2000, quelques hectares de blé n'ont rien produit parce que les agriculteurs avaient fait ce pari et que cet hiver là a été particulièrement sec. A Souaidia, les agriculteurs font aussi des choix différents : le trésorier ne sème que du blé, choisit ne pas prendre de risque et l'irrigue toujours suffisamment tandis qu'un autre agriculteur choisit de planter du piment mais

accepte de prendre des risques en ne l'irrigant pas autant que nécessaire.

3.1.2 Allocation optimale

On connaît une façon d'obtenir l'allocation optimale : il suffit de mettre en place des marchés contingents à la fois sur V et sur S . Ces deux paramètres décrivent un ensemble a priori continu mais il est possible de les rendre discrets avec un pas aussi petit que voulu. Chaque agriculteur achète en début de campagne un volume contingent aux états V et S , à un prix $p(V, S)$. Il maximise donc à la fois une variable, s_i , et un ensemble de volumes contingents $V_i(S, V)$:

$$\underset{s_i, V_i(V, S)}{\text{Max}} \quad EU_i \left[s_i \left[r \left(\frac{V_i(S, V)}{s_i} \right) - k \right] - p(S, V) V_i(S, V) \right]$$

L'ensemble des n maximisations et la contrainte $V = \sum V_i$ permet de déterminer les prix contingents d'équilibre $p(S, V)$.

Indépendamment de la forme de la fonction de bien-être collectif, cette allocation optimale aboutit à un partage Pareto-efficace du risque (Gollier, 1999). Soit $z(S, V)$ la valeur créée sur l'ensemble du périmètre irrigué. Une condition nécessaire d'optimalité du partage de risque est alors celle dite d'Arrow-Borsch (Gollier, 1999) :

$$\forall i \in I \quad \frac{\partial \pi_i}{\partial z} = \frac{T_i}{T}$$

Gollier et Eeckhoudt (1992) montrent qu'il existe quatre cas pour lesquels les partages optimaux du risque sont représentés par des règles linéaires de la forme $\pi_i = a_i + b_i z(S^*, V)$, avec $\sum a_i = 0$ et $\sum b_i = 1$:

- lorsque les tolérances absolues sont constantes, alors $\pi_i = a_i + \frac{T_i}{T} z(S^*, V)$;
- lorsque les tolérances relatives sont constantes, alors $\pi_i = b_i z(S^*, V)$;
- lorsque un membre est neutre au risque, il prend alors en charge tout le risque et les autres ont un profit constant ;
- lorsque les fonctions d'utilité sont quadratiques $u(\pi) = \pi - \beta \pi^2$, alors $a_i = \frac{1}{2\beta_i} - b_i \sum \frac{1}{2\beta_k}$.

Si on impose en plus que chaque agriculteur doit recevoir en moyenne le même revenu, l'espérance du revenu individuel est :

$$\forall i \in I \quad E(\pi_i) = a_i + b_i E(z(V)) = C$$

En sommant sur tous les agriculteurs : $\sum a_i + E(z(V)) \sum b_i = nC$, d'où $C = \frac{E(z(V))}{n}$ et $a_i = \frac{E(z(V))}{n} - b_i E(z(V))$. Le profit individuel est donc de la forme :

$$\pi_i = \frac{E(z(S, V))}{n} + b_i (z(S, V) - E(z(S, V)))$$

La répartition est peut être alors schématisée par la figure (3.2).

Enfin, si la Collectivité peut se constituer un fonds propre (ou faire appel à une assurance monétaire extérieure qui propose une prime actuarielle), le revenu des agriculteurs est constant et vaut $\frac{E(z(V))}{n}$ pour l'allocation donnant un revenu moyen constant précédente.

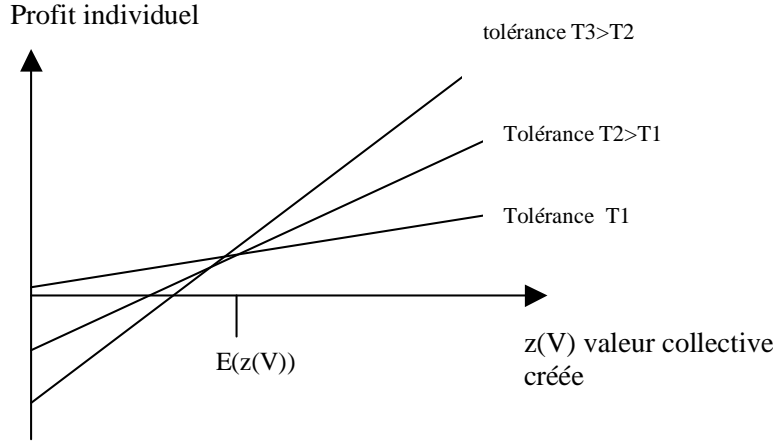


FIG. 3.2 – revenu individuel en fonction de la valeur créée collectivement, dans le cas d'un partage linéaire du risque et d'un revenu moyen constant

Enfin, en toute généralité, la Collectivité peut être vue comme un agent doté d'une tolérance absolue $T = \sum_{i \in I} T_i$ (Gollier, 1999). Puisque tous les agriculteurs sont averses au risque, la Collectivité l'est aussi.

La surface associée à la prise optimale de risque est donc celle déterminée par le programme de l'agriculteur seul (3.2) pour un tel agent représentatif de tolérance absolue T .

3.1.3 Indépendance des agriculteurs pour les choix d'assolement

Comme au chapitre précédent, on suppose que l'impact des choix de surface d'un agriculteur sur un autre n'intervient qu'à travers la modification de la surface collective totale $S = \sum s_i$. **On suppose aussi que la Collectivité ne connaît pas les aversions au risque des individus et ne peut donc pas s'en servir pour répartir l'eau.** Compte-tenu du caractère difficilement mesurable de l'aversion au risque, cette hypothèse est très réaliste.

L'allocation collective est donc la donnée d'une fonction $f(s_i, S, \tilde{V})$ telle que $\tilde{V} = \sum_{i \in I} f(s_i, S, \tilde{V})$ et d'une fonction $t(s_i, S, \tilde{V})$ avec $\sum_{i \in I} t(s_i, S, \tilde{V}) \geq KT(\tilde{V})$, où $KT(\tilde{V})$ représente le coût de production de l'eau. La Collectivité résout alors le programme suivant :

$$\begin{aligned}
 \underset{f, t}{Max} \quad & F \left[EU_1, \dots, EU_i \left(s_i \left[r \left(\frac{f(s_i, S, \tilde{V})}{s_i} \right) - k \right] - t(s_i, S, \tilde{V}) \right), \dots, EU_n \right] \\
 \text{s.c.} \quad & \left\{ \begin{array}{l} \forall i \in \{1, n\} \quad s_i = \underset{s_i}{Arg \ Max} \ EU_i \left[s_i \left[r \left(\frac{f(s_i, S, \tilde{V})}{s_i} \right) - k \right] - t(s_i, S, \tilde{V}) \right] \\ \forall \tilde{V} \in H \quad \sum_i f(s_i, S, \tilde{V}) = \tilde{V} \\ \forall \tilde{V} \in H \quad \sum_i t(s_i, S, \tilde{V}) \geq KT(\tilde{V}) \end{array} \right.
 \end{aligned}$$

L'existence et l'unicité de l'équilibre de Nash, pour un couple (f, t) donné, se fondent sur les mêmes arguments que ceux développés en univers certain au chapitre 2.

Par la suite, pour alléger les expressions mathématiques, la fonction de densité sur le volume sera omise dans les différentes intégrales.

3.1.4 Critères d'évaluation

Les marchés contingents sur les volumes V et les surfaces totales S n'existent pas en pratique, probablement parce que les contrats relatifs à ces états contingents sont trop complexes. L'étude cherche ici à comparer différentes formes d'allocation existantes ou possibles lorsque ces marchés contingents ne peuvent pas être mis en œuvre. Il n'existe plus alors de propriété d'optimalité et il est possible de se donner 5 critères d'évaluation. Trois premiers critères peuvent être vus comme issus des conditions de premier ordre du problème précédent.

1) L'égalisation des valorisations marginales à surface et volume donnés

Ce critère correspond à la condition nécessaire d'efficacité *ex post*.

2) La mise en culture d'une surface totale correspondant à la tolérance collective au risque.

Il s'agit de la condition nécessaire d'efficacité *ex ante*. En effet, la Collectivité ne peut pas être considérée comme neutre au risque.

3) La mise en place de mécanismes de partage de risque

Puisque les agriculteurs diffèrent par leur aversion au risque, il est possible de réaliser un gain collectif en transférant du risque entre les agriculteurs.

Enfin, on peut définir deux autres critères qui ne sont pas inclus dans le problème précédent.

4) La diminution de la variabilité inter-annuelle des revenus

Ce critère correspond à la possibilité de pouvoir stocker un capital d'une année à l'autre : la contrainte budgétaire devient alors $E\left(\sum t(s_i, S, \tilde{V})\right) \geq E(KT(\tilde{V}))$.

5) L'équité dans l'allocation de l'eau

L'aversion au risque est une caractéristique personnelle : comme cela a été vu au chapitre 1, le concept d'équité qui est souvent retenu dans ces cas-là est que le Gestionnaire n'a pas alors à tenir compte de cette caractéristique lorsqu'il répartit l'eau. Par conséquent une allocation sera considérée comme équitable si elle constitue une amélioration *paretienne* de l'allocation de référence, i.e. l'allocation *ex ante*.

3.1.5 Les différentes règles d'allocation étudiées

La typologie des règles de gestion présentée p. 22 est ici toujours valable mais se lit de façon particulière. L'allocation de référence est l'allocation *ex ante* qui consiste ici à attribuer à chaque agriculteur une part fixe λ_i du volume total V , quelle que soit la valeur réalisée de celui-ci.

On peut alors distinguer trois grandes familles de règles d'allocation pour tenter de gérer collectivement l'incertitude sur la pénurie d'eau.

D'abord, lorsque ni les marchés ni les mécanismes d'assurance extérieurs au système irrigué existent, **une possibilité consiste à partager le risque par le biais même de la ressource en eau**. Ainsi, la règle d'allocation *ex post* définie au chapitre précédent permet ce partage de risque puisque elle alloue l'eau à chaque agriculteur proportionnellement à ce qu'il a mis en culture. De même, sur le bassin de l'Adour, dans les départements des Landes et du Gers, jusqu'il y a peu les cultures sous contrat (maïs semence, cultures légumières) n'étaient pas concernées par les interdictions préfectorales de prélèvement pendant les périodes de sécheresse (Faÿsse, 1998).

Une deuxième famille consiste à **mettre en place des marchés**. On a proposé une explication ci-dessus pour justifier le fait qu'en pratique, il n'existe pas d'ensemble de marchés contingents à la fois au volume collectif total et à la surface totale mise en culture sur le système irrigué. Deux formes de marché existent en revanche : le marché *ex ante* où les agriculteurs échangent en début de campagne des parts du volume qui sera ensuite réalisé et le marché *ex post* où les agriculteurs échangent des volumes une fois les surfaces et le volume collectif réalisés.

Enfin, il existe **des mécanismes d'assurance extérieurs au système irrigué qui permettent en théorie de gérer la ressource en eau selon une cohérence propre**. Néanmoins, ces mécanismes engendrent aussi des comportements d'aléa moral en surassement et de plus, l'incertitude portant sur la ressource sur toute une région, les risques individuels subis dans cette région sont corrélés : pour pouvoir assumer une sécheresse, l'institution qui propose ce mécanisme devra épargner ou gérer des bassins versants suffisamment éloignés pour que les épisodes de sécheresse ne soient pas corrélés.

Les différentes règles d'allocation possibles peuvent être construites à partir de deux fonctions d'allocation de l'eau et de quatre formes générales de fonctions de taxation.

- L'allocation en eau peut se faire proportionnellement à la ressource ($\lambda_i V$) ou en distribuant l'eau de façon *ex post* selon les besoins ($\frac{sV}{S}$).
- Quant à la taxe elle peut se faire au volume (pV_i), par un marché, à la surface $t(s_i)$ ou encore par un mécanisme d'assurance extérieur.

Les différents couples possibles sont présentés en figure (3.3) (les parties grisées indiquent les règles utilisées en pratique).

Dans la suite, les règles d'allocation lorsqu'il n'y a pas d'assurance extérieure sont d'abord caractérisées : les règles avec allocation *ex ante* (tarification au volume et marchés), puis les règles avec allocation *ex post* (tarification au volume et marché). La dernière sous-section de cette partie présente les différents mécanismes d'assurance possibles.

		allocation	
		<i>ex ante</i>	<i>ex post</i>
taxation	linéaire au volume		
	marché		
	linéaire à la surface		
	assurances		

FIG. 3.3 – les différentes règles d'allocation étudiées (en grisé : allocations existantes)

3.2 Des règles d'allocation sans assurance extérieure

3.2.1 Une allocation de l'eau de type *ex ante*

Il est possible de définir trois règles utilisant une allocation de type *ex ante* : la tarification au volume, le marché *ex ante* et le marché d'options.

Tarification au volume et allocation *ex ante*

L'allocation *ex ante* est définie par l'obtention par chaque agriculteur d'une fraction fixe λ_i du volume collectif V ; il peut payer ce volume à un prix p par unité de volume, connu *ex ante*, cependant dans la plupart des cas il paiera plutôt une somme forfaitaire fonction de λ_i . Avec une telle règle d'allocation, le risque global est transmis à tous les usagers de façon linéaire.

La règle d'allocation *ex ante* est extrêmement utilisée, et ce à tous les niveaux de gestion de l'eau.

Au niveau du périmètre irrigué d'abord : les périmètres irrigués mis en place dans les Indes au XIX^{ème} siècle étaient conçus pour répartir équitablement à la fois la rareté et l'incertitude sur l'eau. Au niveau du tertiaire, le système *warabandi* alloue ainsi à chaque agriculteur le débit du canal pendant un temps fixé, indépendamment de la valeur réelle de ce débit.

Au niveau supérieur, les canaux secondaires (*distributaries*) de ces périmètres irrigués en Inde et au Pakistan sont ouverts ou fermés selon une rotation effectuée par périodes de 8 jours pendant la période de sécheresse. Là aussi, la probabilité de recevoir un débit faible est identique pour tous les secondaires (Perry et Narayanamurthy, 1998).

Des exemples existent aussi en France : le canal de l'Alaric a le droit - historique - de prélever 1/3 du débit de l'Adour. Dans la *huerta* de Valence en Espagne, le débit de la rivière est traditionnellement partagé de façon proportionnelle en *filas*, entre les différentes communautés d'irrigants (Fernandez, 2001).

A un niveau supérieur encore, le traité du Gange de 1996 stipule que, si le débit de ce fleuve à la frontière passe en-dessous de 1980 m³/s, alors le débit est partagé proportionnellement entre l'Inde et le Bangladesh (Dinar, 1997). De même, 8 des 21 contrats régissant la répartition du débit des rivières entre différents Etats des Etats-Unis sont fondés sur une règle de proportionnalité (Bennett et Howe, 1998).

De façon plus générale, c'est aussi cette forme de répartition de la pénurie qui est utilisée lorsque les droits d'eau sont définis sans ordre de priorité sur une rivière, tel que dans le

système de *riparian rights* en Angleterre et aux Etats-Unis (Scott et Coustalin, 1995). Avec une allocation de type *ex ante*, les agriculteurs font les choix de façon indépendante les uns des autres : **il n'y a aucun partage de risque entre les agriculteurs**. Leur choix est décrit par le modèle de l'agriculteur seul tel que présenté ci-dessus.

Marché *ex ante*

En début de campagne, les agriculteurs peuvent s'échanger des droits sur l'eau qui sera disponible. Ils choisissent, dans un deuxième temps, l'étendue de leur surface irriguée. Sur des petits périmètres traditionnels, ces marchés ont existé dans les oasis du Sud tunisien jusqu'au XX^{ème} siècle (Bédoucha, 1984). On échangeait alors un temps d'irrigation sur le canal, indépendamment du débit réalisé. Plus récemment, ce type de marché a été mis en place sur des zones plus importantes.

Un premier exemple est celui des rivières au Chili dans les années 70, où l'administration a distribué les droits initiaux avant de mettre en place le marché (Bauer, 1997). Les droits sont initialement exprimés en débits absolus mais ils deviennent des portions du débit effectif si celui-ci devient trop bas (Rosegrant et Binwanger, 1994).

De même, les usagers en aval du barrage Big-Thomson aux Etats-Unis peuvent acheter ou vendre en début de campagne des parts qui correspondent à $1/310000$ ^{ème} de la ressource qui sera stockée dans le barrage en cours de campagne (une part correspond à 864 m³/an en moyenne) (Howe et al., 1995). Un quota initialement garanti est donc éventuellement augmenté en cours de campagne si la ressource le permet. Depuis la création du barrage, le quota a ainsi été augmenté de 10 à 30% environ une année sur trois (Michelsen, 1994).

Dudley (1992) propose que le volume incertain contenu dans un barrage soit divisé en parts virtuelles dont les différents usagers avals seraient propriétaires et qu'ils pourraient s'échanger. Il estime que le marché serait facilité par le fait que, puisqu'il n'y a pas d'interactions entre les usagers, la fonction de densité de probabilité associée à une part donnée est fixe et peut être connue facilement du vendeur et de l'acheteur.

Proposition 2 *Le marché ex ante permet à chaque agriculteur d'affiner la forme de sa prise de risque : par rapport à une distribution ex ante égale entre les agriculteurs, les agriculteurs averses au risque vont augmenter la quantité d'eau moyenne à l'hectare tandis que les agriculteurs moins averses vont la diminuer (fig. 3.4). Cependant, il n'y a ni partage optimal du risque ni valorisation optimale de l'eau ex post.*

La démonstration de la proposition est faite en annexe 3-2.

Ainsi, lors de la répartition des droits d'eau par enchères dans l'Etat de Victoria en Australie, des agriculteurs ont acheté des droits supplémentaires dans le seul but de pour pouvoir garantir la ressource en eau lors des années de sécheresse (Simon et Anderson, 1990).

Cependant, le marché *ex ante* ne conduit pas toujours à une amélioration de la valorisation de la ressource, comme le montrent Zimmerman et Carter (1999) sur l'exemple d'un marché de terres. Ils étudient les droits de propriété des terres dans le Sahel, région où de façon générale la productivité de la terre décroît avec la taille de l'exploitation. Ils calculent la valeur d'option associée à la possibilité d'un marché des terres entre agriculteurs hétérogènes dans leur possession initiale. Zimmerman et Carter montrent que

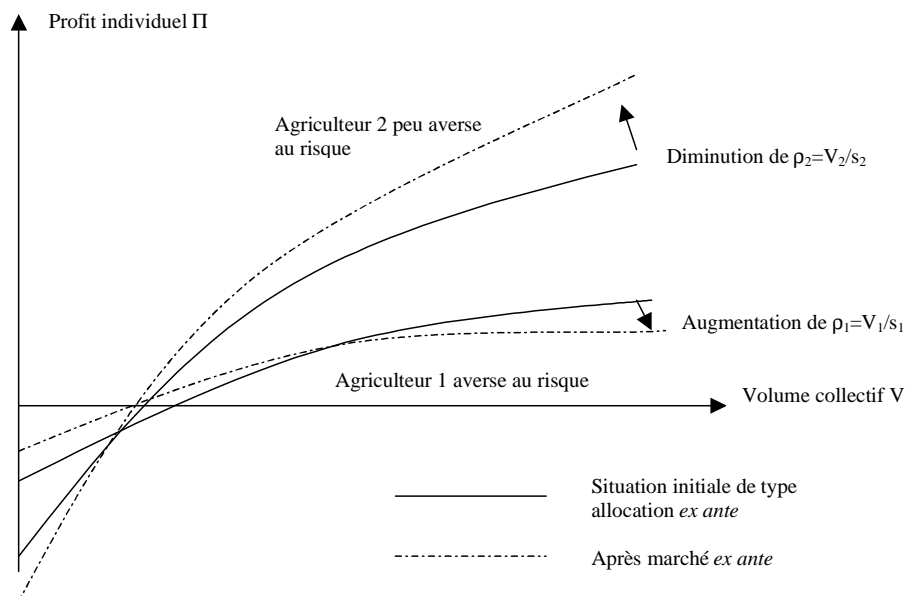


FIG. 3.4 – évolution des profits des agriculteurs en fonction du volume globalement disponible avec une allocation *ex ante* complétée ou non d'un marché.

cette valeur est très forte pour les agriculteurs les moins bien dotés car le marché leur permet de diminuer la variabilité de leur revenu. Ils estiment ainsi que, dans certains cas, ces marchés peuvent avoir un impact économique ambigu, notamment en diminuant la productivité de la terre puisque **de petits agriculteurs averses au risque et valorisant bien la terre vendront leurs terres aux grands agriculteurs, moins averses mais valorisant moins bien la terre.**

D'un point de vue pratique, Bauer (1997) estime qu'une des raisons du faible échange de droits au Chili vient du fait que les débits des rivières sont très variables : il faut échanger des fractions fixes du débit de la rivière ou du canal, et il est très difficile de réaliser des ouvrages permettant ce partage et pouvant permettre éventuellement une évolution du débit prélevé.

Marché d'options

Des marchés d'option appliqués à l'eau sont utilisés aux Etats-Unis. Il s'agit en fait d'**une simplification des marchés contingents complets**. Une option consiste en un droit à acheter une quantité d'eau, soit choisie par l'acheteur de l'option pendant la campagne d'irrigation, soit définie dans le contrat initial, à un prix d'exercice donné lorsque des conditions précisées au départ sont vérifiées. Que l'option soit exercée ou non, l'acheteur doit acheter le droit d'utiliser l'option. Aux Etats-Unis, une "banque de l'eau" définit en début de campagne le débit de la rivière à partir duquel l'exercice de l'option entrera en vigueur ainsi qu'un prix qui peut être soit le prix d'exercice soit le prix de l'option. Si l'un de ces deux paramètres est fixé par la banque, le deuxième peut être fixé par le marché. Chaque agent peut décider de vendre ou d'acheter une option à ces conditions données.

Ces marchés sont par exemple utilisés en Californie : les cités de la côte achètent de tels droits aux agriculteurs riverains du Colorado de façon à pouvoir assurer une ressource

en eau en cas de sécheresse (Michelsen et Young, 1993, Shupe et al., 1989). Hamilton et al. (1989) démontrent l'intérêt d'un marché de droits interruptibles dans l'état d'Idaho, où des agriculteurs contractualiseraient avec des entreprises d'hydroélectricité pour leur prêter leur droit d'eau pendant les années de sécheresse. En 1995, la banque de l'eau californienne acheta ainsi à des agriculteurs une option sur des droits d'eau utilisables pendant la période de sécheresse, et ce pour un total de 36 millions de m³. La Banque acquit l'option pour 3\$ les 1000m³ pour ensuite pouvoir utiliser le droit de les acheter à un prix de l'ordre de 32\$ les 1000m³ (Jercich, 1997).

3.2.2 Une allocation de l'eau de type *ex post* associée à une tarification au volume ou un marché

Tarification au volume

L'agriculteur i reçoit une allocation totale de $\frac{s_i V}{S}$, qu'il paie à un prix p par unité de volume. Par conséquent, son profit est $\pi(s_i) = s_i \left[\left(r\left(\frac{V}{S}\right) - k - \frac{pV}{S} \right) \right]$. On suppose comme précédemment que, puisqu'il y a beaucoup d'agriculteurs, S ne dépend pas de s_i .

Proposition 3 *L'allocation ex post couplée à une tarification au volume permet de respecter, au premier ordre d'approximation, les conditions de partage optimal du risque. De façon générale cependant, elle n'aboutit pas au niveau optimal de prise de risque pour la Collectivité. Enfin, elle permet de valoriser l'eau au mieux ex post.*

La démonstration est faite en annexe 3-3. De plus, on montre qu'un agriculteur résout un dilemme Espérance-Variance en fonction de son niveau de tolérance (voir annexe) :

$$s_i \simeq \text{Min} \left(s_m, \text{Tolérance} * \frac{\text{Espérance du profit}}{\text{Variance du profit} + \text{Espérance du profit}^2} \right)$$

On déduit de cette relation l'équation définissant S :

$$S \simeq \sum \min \left(s_m; T_i \frac{\left[\int_V r\left(\frac{V}{S}\right) - \frac{pV}{S} \right] - k}{\int_V \left(r\left(\frac{V}{S}\right) - k - \frac{pV}{S} \right)^2} \right)$$

Si aucun agriculteur n'atteint la surface maximale, S est, au premier ordre d'approximation, une fonction linéaire de la tolérance collective au risque $T = \sum T_i$. De plus, si cette tolérance collective devient très grande, S tend vers la surface qui annule le profit moyen, soit : $\int_V r\left(\frac{V}{S}\right) - \frac{pV}{S} = k$: **lorsque la tolérance collective au risque devient importante, une Tragédie des Communs conduit, en l'absence de limitations sur les surfaces, à un profit moyen qui tend vers 0.**

De plus, il existe alors aussi un niveau de tolérance collective T^* à partir duquel la surface qui sera collectivement semée est supérieure à la surface d'un agent neutre au risque qui disposerait de toute la ressource. Cette surface sera alors nécessairement aussi supérieure à la surface que choisirait un agent seul de tolérance T^* : **à partir d'un certain niveau de tolérance collective au risque, il y a une Tragédie des Communs de sur-prise de risque.**

La forme très générale du modèle ne permet pas ici de comparer allocations *ex ante* et *ex post* : il n'est pas possible de caractériser plus précisément cette sur-prise de risque. C'est pourquoi la section suivante présente l'utilisation d'une fonction de production donnée qui permet d'effectuer la comparaison.

Enfin, si l'agriculteur ne sature pas sa surface :

$$E\pi_i \simeq T_i \frac{(\left[\int_V r\left(\frac{V}{S}\right) - \frac{pV}{S}\right] - k)^2}{\int_V (r\left(\frac{V}{S}\right) - k - \frac{pV}{S})^2}$$

Le risque pris individuellement est ici entièrement partagé entre les agriculteurs puisqu'ils obtiennent tous une part donnée de la production totale.

De plus, les gains sont proportionnels aux tolérances au risque, c'est pourquoi une telle répartition de l'eau n'est équitable que s'il existe une rotation pour la prise de risque. Ainsi, en Tunisie, dans certains périmètres irrigués, la règle de priorité pour ceux qui ont planté des cultures sensibles au stress peut être considérée comme équitable car, pour des contraintes culturelles, chaque agriculteur est amené à planter ces cultures certaines années et planter des céréales d'autres années.

En revanche, dans le bassin de l'Adour, pendant de nombreuses années, les cultures sous contrat (maïs semence, cultures légumières) bénéficiaient d'une exception lors des interdictions départementales de prélèvement. De plus, les exceptions aux interdictions préfectorales dont ils disposaient ne donnaient droit à aucune indemnité pour les autres. Les agriculteurs ayant ces contrats étant souvent les mêmes d'une année à l'autre, cette mesure d'exception était perçue comme injuste et cette règle a été progressivement abandonnée. Elle aurait pu être conservée si un système de rotation dans l'obtention des contrats avait été mis en place, mais se pose alors le problème du coût de réalisation de ces nombreux contrats entre agriculteurs et coopératives.

Marché *ex post*

Ici, le prix de vente de l'eau *ex post* q est endogène et déterminé par le marché en fonction du volume réalisé V et de la surface totale mise en culture : on peut le noter $q(V, S)$.

Les marchés *ex post*, i.e en cours de campagne, existaient dans les oasis du Sud tunisien (Bédoucha, 1984), mais aussi dans la région de Valence en Espagne (Ostrom, 1992). Dans ce dernier exemple, le périmètre d'irrigation de 3700 ha est géré par une Association d'Irrigants, qui délivre l'eau et la tarifie au volume. La disponibilité en eau est très irrégulière. Tous les dimanches matins, les propriétaires de droits d'usage vendent publiquement leurs droits hebdomadaires (Reidinger in LeMoigne et al., 1992).

Plus récemment, sur une zone bien plus vaste, la California Drought Emergency Water Bank fut mise en place en 1991 et 1992 pour coordonner l'échange entre les acheteurs et les vendeurs. Au Texas, en 1998, 300 achats ponctuels d'eau ont eu lieu sur le Rio Grande, principalement constitués par le transfert de l'usage agricole vers d'autres usages (Yoskowitz, 1999). Le marché peut aussi être informel : Bandaragoda (1998) estime que la vente d'eau a lieu sur 5% des *warabandi*. Cette vente se fait entre irrigants, directement. La loi cependant interdit ces pratiques.

Soit $W_{i0}(V)$ le volume initial dont dispose l'agriculteur lorsque le volume collectif est V et W_i son volume après échange sur le marché. Le profit total vaut donc :

$$\pi(s_i, W_i) = s_i \left[r\left(\frac{W_i}{s_i}\right) - k \right] - q(V, S)(W_i - W_{i0}(V))$$

Proposition 4 *Le marché ex post permet aussi de vérifier les conditions de partage optimal de risque au premier ordre d'approximation et valorise l'eau de façon optimale ex post, même s'il ne conduit pas non plus de façon générale au niveau optimal de prise de risque du point de vue de la Collectivité.*

Lorsque la tolérance au risque du groupe est importante et lorsque le prix de l'eau est faible, l'allocation ex post conduit à une Tragédie des Communs de surassollement. Dans ces conditions, la surface totale avec marché ex post est inférieure à la surface totale avec allocation ex post : le marché permet de diminuer l'importance de ce surassollement.

Démonstration : voir annexe 3-3.

Pour un agriculteur neutre au risque, le prix d'échange sur un marché *ex ante* est la valeur stratégique de l'eau telle que définie par Tardieu (1999, cf p. 2.2.3), et c'est la valeur tactique qui donne le prix sur un marché *ex post*. Tardieu note d'ailleurs que, pour la plus grande partie du cycle cultural, la valeur tactique est supérieure à la valeur stratégique. Cette inégalité est mesurée et montrée par Keplinger et al. (1998) qui étudient l'offre faite aux agriculteurs de l'aquifère Edwards au Texas d'adhérer à un programme de suspension de l'irrigation pendant les années sèches, de façon à laisser de l'eau pour les usages non agricoles. Le prix payé aux agriculteurs est fonction du fait que l'annonce d'une réduction du volume prélevable est faite avant le choix des surfaces irriguées ou après.

Le marché *ex post* apporte en tout cas toujours au moins autant que l'allocation *ex ante* pour tous les agriculteurs, puisque personne n'est obligé de vendre ou d'acheter. Néanmoins, le marché *ex post* sera d'autant plus efficace que les agriculteurs anticipent correctement la surface totale qui sera mise en culture. L'incertitude sur cette surface peut les conduire à une stratégie de protection, stratégie de protection qui peut être en partie compensée par un marché *ex ante*.

3.2.3 Utilisation d'une fonction de production hyperbolique

Tous les calculs précédents utilisant une allocation *ex post* ont pu être fait exactement car la fonction de production est toujours évaluée à $\frac{V}{s}$. En revanche, pour une allocation *ex ante*, on devra garder dans l'intégration des termes en $r(\frac{\lambda_i V}{s_i})$, ce qui ne permet pas d'obtenir des solutions exactes. Une possibilité est d'attribuer une forme plus précise à la fonction de production. On pose ici, pour tout $v \succeq 1$: $r(v) = 1 - \frac{1}{v}$, ce qui permet d'obtenir :

$$r\left(\frac{V}{s}\right) = 1 - \frac{s}{V}$$

Le profit est alors :

$$\pi(s) = s \cdot r\left(\frac{V}{s}\right) - ks - pV = s\left(1 - \frac{s}{V}\right) - ks - pV = (1 - k)s - \frac{s^2}{V} - pV$$

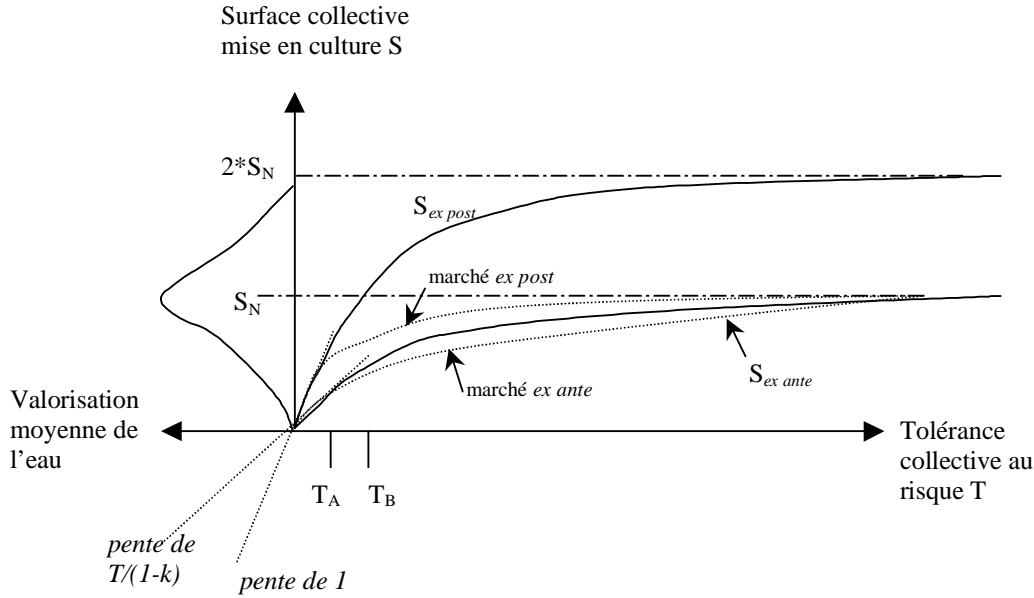


FIG. 3.5 – évolution de la surface collective en fonction de la tolérance collective avec allocation ou marché de type *ex ante* ou *ex post* et un prix de l'eau faible

Pour une collectivité ou un agent neutre au risque, le choix de la surface se fait selon le programme :

$$\begin{aligned} \text{Max}_s \int_V s.r\left(\frac{V}{s}\right) - ks - pV &= \text{Max}_s \int_V s\left(1 - \frac{s}{V}\right) - ks - pV \\ \frac{d}{ds} E\pi &= 0 = (1 - k) - 2\left(\int_V \frac{1}{V}\right)s \end{aligned}$$

La surface choisie est alors $S_N = \frac{1-k}{2 \int_V \frac{1}{V}}$ et le profit $\Pi(S_N) = \frac{(1-k)^2}{4 \int_V \frac{1}{V}}$.

L'utilisation de la fonction hyperbolique permet d'obtenir la relation $S(T)$ suivant les différentes règles d'allocation (figures 3.5 et 3.6). Les calculs sont donnés en annexe.

Dans ce cadre, le marché *ex post* donne une surface totale proche de celle *ex ante* pour une tolérance faible et tend vers S_N quand T tend vers l'infini.

On remarque que, à partir d'une certaine tolérance au risque (T_B sur la figure 3.5), la tarification au volume couplée à l'allocation *ex post* conduit à une surface supérieure à celle que choisirait une collectivité neutre au risque; or cette dernière permet de maximiser le profit moyen. Par conséquent, pour une tolérance collective supérieure ou égale à T_B , on est dans la situation classique d'une Tragédie des Communs où une baisse de la surface conduirait à une augmentation du profit espéré.

De plus, on peut considérer que le marché *ex post* est le mécanisme le plus proche des marchés contingents complets : c'est le mécanisme qui permet d'avoir la meilleure estimation de ce que pourrait être la surface totale associée à une tolérance collective au risque donnée. L'excès de prise de risque associé à une allocation *ex post* est donc présent dès la valeur T_A de tolérance collective. En revanche ici, pour des valeurs de tolérance collective comprise entre T_A et T_B , cet excès de prise de risque conduit à une augmentation de la valorisation moyenne.

Proposition 5 *La Tragédie des Communs de surasselement consécutive à une allocation ex post taxée au volume peut conduire, dans certains cas, à une augmentation de*

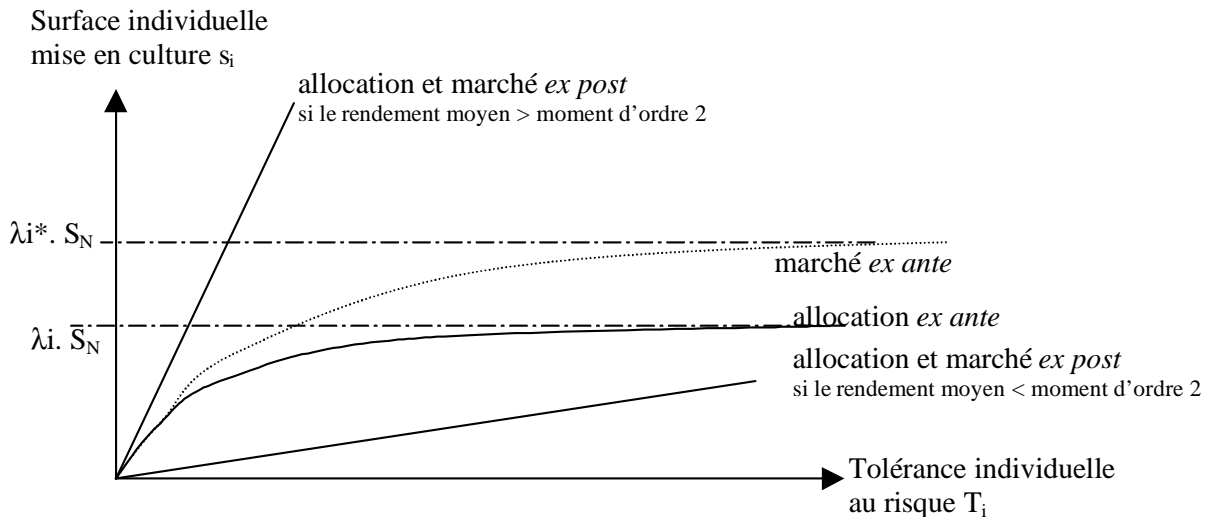


FIG. 3.6 – évolution de la surface individuelle en fonction de la tolérance individuelle avec allocation ou marché de type *ex ante* ou *ex post*, prix de l'eau faible

la valorisation moyenne.

Ce résultat important sera aussi validé par un des cas d'étude de périmètre irrigué en Tunisie (voir section 5). Il a été aussi mis en évidence dans le cas de pâturages en Ethiopie (McCarthy, 2001). McCarthy (2000, 2001) étudie la densité de bétail choisie par les pasteurs en Afrique Sub-saharienne. Elle montre que, dans les parcours en commun, le revenu en année moyenne est supérieur à celui des parcours privés, tandis qu'en période de sécheresse le revenu des parcours en commun chute considérablement, bien plus que sur les parcours privés (voir aussi au chapitre 1 p. 60).

3.2.4 Des droits de priorité entre usagers

Une autre forme d'allocation de type *ex post* est la définition d'un ordre de priorité entre les usagers.

En Californie

En Californie, historiquement, on a d'abord utilisé le droit de l'Est des Etats-Unis issu du droit anglais, le droit riverain (*riparian rights*). Ensuite, le XIX^{ème} siècle a vu le développement des droits d'appropriation, divisés en droits de priorité (*priority rights* : "first in time, first in right") et droits proportionnels (*proportional rights*) (Howe et al., 1986). Ces droits d'appropriation induisent une interaction entre les agriculteurs. De même, au Chili, l'administration distingue les droits permanents et les *eventuales*, droits accordés seulement si, les autres usages satisfaits, la ressource est suffisante pour qu'ils puissent être utilisés.

Quelle que soit leur forme particulière, les droits utilisant une règle de priorité ne conduisent ni à une bonne valorisation de l'eau *ex post* ni à un bon partage du risque (Burness & Quirk 1979, Howe et al., 1995). De plus, dans de nombreux cas, les agriculteurs peuvent chercher à obtenir des droits supérieurs à leurs besoins, que ce soit par volonté d'assurance, d'acquisition d'un patrimoine valorisable à long terme, ou à titre spéculatif dans le cadre d'un marché d'eau. Pour empêcher les comportements

stratégiques des détenteurs de droits d'appropriation, l'Etat Californien oblige ceux-ci à utiliser concrètement ces droits (*beneficial use*)(Burness et Quirk, 1979).

Burness et Quirk (1979) estiment cependant qu'un **marché de droits prioritaires permet d'atteindre un optimum de Pareto sur les investissements et se met en place plus aisément qu'un marché de droits proportionnels car de nouveaux droits ne remettent pas en cause les modalités des anciens**. Berck et Lipow (1994) proposent de même qu'en Israël et en Palestine soient instaurés des droits d'eau échangeables avec trois niveaux de priorité pour rendre plus efficace l'allocation entre des cultures qui valorisent l'eau à des degrés très différents. En Californie, sur la rivière Truckee, une entreprise d'hydroélectricité a ainsi acheté des droits d'eau à des prix qui dépendaient de leur niveau de priorité, avec une différence de 25% entre les droits juniors et les droits seniors (Saliba et Bush, 1987).

Alaouze (1991), Brennan et Scoccimarro (1999) proposent de mettre en place des marchés de droits différenciés : chaque droit correspondrait à une fraction du volume qui évolue avec le volume total, soit $\lambda_i(V)$ avec $\sum_i \lambda_i = 1$. Les agriculteurs pourraient alors se construire **un portefeuille de droits en volume et niveau de sécurité correspondant à leurs besoins**.

Enfin, pour Brennan et Scoccimarro (1999), quand les droits sont hétérogènes, un système de marché de droits prioritaires est préférable tandis que quand les droits sont homogènes, il serait plus intéressant d'utiliser un système de droits égalitaires.

En Tunisie

Certains GIC, comme Souaidia et Bled Abida, contractualisent avec quelques agriculteurs qui ont des parcelles à l'extérieur mais proches du périmètre, pour que ces agriculteurs puissent acheter de l'eau pendant la campagne d'irrigation. Ces agriculteurs ne seront alors pas prioritaires en cas de tension importante sur la ressource.

3.2.5 Taxe à la surface couplée à une allocation *ex post*

On alloue à chaque agriculteur un volume $\frac{s_i V}{S}$, avec une taxe à la surface $t(s_i)$. Le profit individuel est $\pi = s_i(r(\frac{V}{S}) - k) - t(s_i)$. La condition de premier rang est alors :

$$\int_V \left(r\left(\frac{V}{S}\right) - k - t'(s_i) \right) u' \left(s_i \left(r\left(\frac{V}{S}\right) - k \right) - t(s_i) \right) h(V) dV = 0$$

Pour pouvoir obtenir les conditions nécessaires de partage optimal du risque telles que décrites pour l'allocation *ex post* taxée au volume, il faut que s_i soit linéaire en T_i d'où une taxe linéaire $t(s_i) = \mu s_i$. Alors :

$$s_i = T_i \frac{\int_V r\left(\frac{V}{S}\right) - k - \mu}{\int_V \left(r\left(\frac{V}{S}\right) - k - \mu \right)^2} \text{ et } S = T \frac{\int_V r\left(\frac{V}{S}\right) - k - \mu}{\int_V \left(r\left(\frac{V}{S}\right) - k - \mu \right)^2}$$

L'allocation *ex post* et le marché *ex post* peuvent être vus comme des cas particuliers

de ce mécanisme avec respectivement $\mu = p \frac{V}{S}$ et $\mu = \frac{V}{S} (r' \frac{V}{S})$.

D'autre part, quand μ devient très grand, S tend vers 0, donc il est possible de choisir μ de façon à obtenir une surface totale souhaitée entre 0 et S_{expost} .

Proposition 6 *Tout mécanisme d'allocation fondé sur une allocation ex post et une tarification linéaire à la surface ou au volume vérifie, au premier ordre d'approximation, les conditions nécessaires de partage optimal du risque.*

On peut envisager des fonctions d'allocation qui permettent de protéger plus les agriculteurs plus averses au risque. Il faut utiliser alors des fonctions convexes mais le formalisme adopté ici ne permet pas de résoudre ces équations. Une solution serait par exemple de prendre $t(s_i) = s_i^2 - ks_i$, de telle sorte que $\pi = s_i \left(r(\frac{V}{S}) - s_i\right)$. Alors, lorsque le volume collectif V est faible, la perte de profit est d'autant plus faible que la surface mise en culture est moins importante. Le premier rang donne alors :

$$s_i \int_V \left(r(\frac{V}{S}) - 2s_i\right) \left(r(\frac{V}{S}) - s_i\right) = T_i \int_V \left(r(\frac{V}{S}) - 2s_i\right)$$

Pour des agriculteurs peu tolérants au risque, s_i et π_i sont proportionnels à T_i mais ce n'est plus le cas pour des agriculteurs plus tolérants. Il n'y a alors plus de partage optimal du risque.

3.3 Des assurances extérieures au système irrigué

Enfin, on peut mettre en place des mécanismes d'assurance extérieurs au système irrigué. Ces mécanismes permettent de constituer un fonds d'une année sur l'autre, i.e. de se prémunir contre le risque global sur le volume collectif.

On peut imaginer d'associer ces mécanismes avec une allocation *ex ante* ou *ex post*.

Cela dit, un mécanisme d'assurance diminue l'écart de mise en culture entre des agriculteurs peu et très averses au risque, et donc l'écart de valorisation *ex post* de l'eau avec une allocation *ex ante* : il diminue donc l'avantage de passer d'une allocation *ex ante* à une allocation *ex post*. **En pratique, les mécanismes d'assurance sont toujours associés à des allocations de type *ex ante*.**

Trois types d'assurance sont présentés ici :

- l'**assurance récolte** qui correspond à la garantie d'un rendement à l'hectare minimal ;
- l'**assurance revenu** qui garantit à l'agriculteur un revenu supérieur ou égal à un revenu de référence π_0 ;
- une **assurance par zone** : l'agriculteur est indemnisé en fonction de la production totale sur la région.

Les résultats suivants sont obtenus avec une allocation de type *ex ante* : les conclusions sont les mêmes avec une allocation de type *ex post*.

On cherche ici à déterminer ces assurances et à mesurer de quelle manière elles influent sur le choix individuel de prise de risque.

Par ailleurs, on a introduit, par rapport à la situation précédente, un agent extérieur - l'assureur - très tolérant au risque : la tolérance du groupe n'est pas du tout la même.

3.3.1 Assurance sur le rendement

L'assurance rendement en cas de sécheresse est actuellement utilisée dans de nombreux pays. Aux Etats-Unis, cette assurance fonctionne depuis 1938 ; elle a été réformée pour

étendre son champ d'action par le Federal Crop Insurance Reform Act de 1994. L'agriculteur peut désormais choisir un niveau de couverture qui déterminera le rendement garanti (entre 50 % et 75 % du rendement de référence) et l'indemnité en cas de baisse en dessous de ce rendement (entre 60% et 100% du prix de vente estimé) (C.E.S., 1998). Un programme d'assurance rendement - appelée aussi assurance récolte - suite à une sécheresse existe aussi au Portugal et en Autriche (C.E.S, 1998).

Dans ce cadre, l'agriculteur reçoit un volume $V_i = \lambda_i V$ avec l'assurance d'un revenu plancher à l'hectare semé équivalent au revenu d'un volume à l'hectare seuil $r(v_0)$.

L'espérance d'utilité de l'agriculteur est :

$$EU(\pi) = \int_0^{\frac{s_i v_0}{\lambda_i}} u[s_i(r(v_0) - k)] h(V) dV + \int_{\frac{s_i v_0}{\lambda_i}}^{\infty} u\left[s_i\left(r\left(\frac{V}{s_i}\right) - k\right)\right] h(V) dV$$

Par continuité du profit au point frontière :

$$\frac{\partial EU}{\partial s_i} = \int_0^{\frac{s_i v_0}{\lambda_i}} [(r(v_0) - k)] u'(\pi) h(V) dV + \int_{\frac{s_i v_0}{\lambda_i}}^{\infty} \left[\left(g\left(\frac{\lambda_i V}{s_i}\right) - k \right) \right] u'(\pi) h(V) dV = 0$$

On considère que $\frac{\partial^2 EU}{\partial s_i^2} = \Delta \leq 0$ d'où en différenciant :

$$\frac{ds_i}{dv_0} = -\frac{1}{\Delta} \left[r'(v_0) \int_0^{\frac{s_i v_0}{\lambda_i}} u'(\pi) h(V) dV + \frac{s_i}{\lambda_i} (r(v_0) - k) u'(r(v_0) - k) - \frac{s_i}{\lambda_i} ((r(v_0) - k - v_0 r'(v_0)) u'(r(v_0) - k)) \right]$$

$$\frac{ds_i}{dv_0} = -\frac{1}{\Delta} \left[r'(v_0) \int_0^{\frac{s_i v_0}{\lambda_i}} u'(\pi) h(V) dV + \frac{s_i}{\lambda_i} v_0 r'(v_0) u'(r(v_0) - k) \right] > 0$$

La surface choisie par l'agriculteur augmente ainsi avec le niveau du rendement garanti. La différence avec l'assurance revenu vient du fait qu'ici le revenu plancher augmente avec l'augmentation de la surface mise en culture.

L'impact de la mise en œuvre du programme d'aide aux assurances aux Etats-Unis, le Federal Crop Insurance Reform Act de 1994, a fait l'objet d'une étude économétrique par Young et al., 1999 (cité par Young et Westcott, 2000). Cette étude montre que, suite à ce programme, les surfaces semées pour certaines cultures ont effectivement augmenté, mais de façon relativement faible.

En Tunisie, les CRDA incitent depuis deux ans les GIC à signer avec chaque agriculteur un contrat d'abonnement. L'agriculteur s'engage à ne semer qu'un tiers de sa surface l'été et deux tiers l'hiver. En échange, le GIC s'engage à prendre en charge les dégâts subis par les cultures en cas de panne du réseau. Il n'y a pas encore eu d'application d'une telle règle. Ce contrat est utilisé à Souaidia depuis 1998. Il permet aussi d'inciter le Conseil d'Administration à organiser la maintenance du réseau.

En fait, à travers le contrat et avec les possibilités de crédit, les GIC sont aussi des structures d'assurance de plus en plus importantes. Ces GIC possèdent désormais une trésorerie qui leur permet de jouer ce rôle. Un risque important, pour ces GIC, est alors le non remboursement des dettes.

3.3.2 Assurance sur le revenu

L'assurance revenu est un système qui se développe depuis peu de temps. Le Canada passe actuellement d'une assurance récolte à une assurance revenu. De même, cette assurance revenu est testée depuis 1997 dans quelques régions des Etats-Unis (C.E.S., 1998). Dans les deux cas, la sécheresse est un événement climatique couvert par l'assurance.

En France, il n'y a pas actuellement d'assurance revenu. Cependant, en 1998, le Conseil Economique et Social conseille, outre le développement d'assurances récolte, d'expérimenter l'assurance revenu pour les grandes cultures et les fruits.

On assure ici un revenu $\pi \geq \pi_0$. L'assurance se met en place pour $s_i(r(\frac{\lambda_i V}{s_i}) - k) \geq \pi_0$ soit $V_{0i} = \frac{s_i}{\lambda_i} r^{-1}(\frac{\pi_0}{s_i} + k)$.

L'utilité espérée de l'agriculteur est alors :

$$\begin{aligned} EU(\pi) &= \int_0^{V_{i0}} u[\pi_0] h(V) dV + \int_{V_{0i}}^{\infty} u \left[s_i \left(r \left(\frac{\lambda_i V}{s_i} \right) - k \right) \right] h(V) dV \\ &= u[\pi_0] u(V_{i0}) + \int_{V_{0i}}^{\infty} u \left[s_i \left(r \left(\frac{\lambda_i V}{s_i} \right) - k \right) \right] h(V) dV \end{aligned}$$

De même $\frac{\partial EU}{\partial s_i} = \int_{\frac{s_i}{\lambda_i} r^{-1}(\frac{\pi_0}{s_i} + k)}^{\infty} \left(r \left(\frac{\lambda_i V}{s_i} \right) - k - \frac{\lambda_i V}{s_i} r' \left(\frac{\lambda_i V}{s_i} \right) \right) u'(\pi) f(V) dV = 0$. On suppose ici aussi que $\frac{\partial^2 EU}{\partial s_i^2} = \Delta \leq 0$ d'où en différenciant, avec $v_{i0} = \frac{\lambda_i V_{i0}}{s_i} = r^{-1}(\frac{\pi_0}{s_i} + k)$, on a

$$\frac{ds_i}{d\pi_0} = \frac{1}{\Delta} \frac{1}{\lambda_i} (r^{-1})' \left(\frac{\pi_0}{s_i} + k \right) [r(v_{i0}) - k - v_{i0} r'(v_{i0})] u'(\pi_0) h(V_{i0})$$

D'après l'équation de premier rang et puisque $\left(r \left(\frac{\lambda_i V}{s_i} \right) - k - \frac{\lambda_i V}{s_i} r' \left(\frac{\lambda_i V}{s_i} \right) \right)$ est croissante, cette fonction évaluée en $\frac{s_i}{\lambda_i} r^{-1}(\frac{\pi_0}{s_i} + k)$ est négative. Donc $\frac{ds_i}{d\pi_0} > 0$.

La surface mise en culture augmente avec le revenu minimal garanti.

Babcock et Hennessy (1996) retrouvent le même résultat avec une approche équivalente, puisqu'ils utilisent les probabilités de rendement total (ici $sr(\frac{V}{s})$) conditionnelles au niveau d'input utilisé (ici s) : le facteur clé est dans les deux cas qu'une **augmentation de l'input se traduit par une perte de profit pour les basses valeurs de la variable incertaine**.

Le principal intérêt de l'assurance revenu est qu'elle perturbe peu le marché. Elle va fournir une indemnisation qui ne va pas dépendre des cours du marché : c'est pourquoi l'assurance revenu peut être placée dans la boîte "verte" des aides publiques ne modifiant pas le fonctionnement du marché, au contraire de l'assurance récolte précédente qui elle est placée dans la boîte "orange" des aides provoquant des perturbations (C.E.S., 1998). L'assurance récolte est donc, à terme, moins intéressante que l'assurance revenu car cette dernière n'est pas soumise aux restrictions des aides négociées au sein de l'OMC.

Dans les années à venir, il sera important de mettre en œuvre des assurances revenu qui puissent être considérées comme faisant partie de la boîte "verte" : les assureurs ne devront pour cela verser une indemnisation que si la perte est supérieure à 30% et cette indemnisation ne devra pas dépasser 70% de la perte subie (C.E.S., 1998). C'est parce que les aides versées sont supérieures à ce taux de 70 % que l'assurance revenu

utilisée aux Etats-Unis est actuellement classée dans la boîte “orange” des accords du GATT, et donc fait partie de l'ensemble des subventions qui affectent le fonctionnement du marché et qui de ce fait sont vouées à être réduites dans le cadre des négociations actuelles à l'OMC (C.E.S., 1998).

3.3.3 Assurance par zone

Par rapport aux problèmes généraux concernant l'assurance récolte, il n'y a pas ici d'aléa moral *ex ante* sur la surface, puisqu'il s'agit d'une variable facilement mesurable de l'extérieur. En revanche, **le coût de vérification des rendements réalisés** peut être important (existence d'un aléa moral sur la déclaration de pertes) et explique selon Hyde et Vercammen (1997), à la fois **l'existence d'une franchise et le fait que seules les exploitations auditées sont remboursées**.

L'assurance par zone pourrait être une façon de contourner les problèmes d'aléa moral *ex post* et d'antisélection (Mahul et Vermersch, 2000). Dans ce système d'assurance, chaque agriculteur choisit un niveau de couverture et le niveau seuil de production régionale en deçà duquel il est indemnisé, l'indemnité étant fonction du taux de couverture choisi. Ce type d'assurance fait l'objet de nombreuses contributions récentes et il existe des programmes pilotes aux Etats-Unis depuis 1994. On pourrait imaginer que, en France, lorsque le Préfet interdit les prélèvements, un tel système de compensation soit utilisé. Cependant il est alors possible que l'assureur puisse rencontrer des difficultés pour diversifier les risques et ne pas avoir les ressources financières nécessaires pour assurer une telle couverture : Mahul et Vermersch (2000) proposent alors d'utiliser des titres sur des marchés de capitaux.

On peut généraliser les deux précédentes démonstrations pour les assurances rendement et revenu à tout mécanisme permettant de limiter les pertes en cas de faible allocation en eau.

Proposition 7 *Que ce soit une assurance revenu, récolte, par zone, ou un quelconque mécanisme de soutien du revenu lorsque l'allocation en eau est faible, toute augmentation de l'assurance par ce mécanisme conduit à une augmentation de la surface mise en culture.*

3.3.4 Différents contrats ?

Dans la situation décrite, les aversions au risque individuelles sont connues de façon indirecte voire inconnues par le Principal. Est-il possible d'écrire un menu de contrats optimal de façon à tenir compte de la sélection adverse sur l'aversion au risque ?

Jullien et al. (2000) étendent le modèle traditionnel Principal-Agent en aléa moral lorsque l'aversion pour le risque de l'agent est une information privée. Le Principal propose alors un menu de contrats qui devra différencier les différents types d'agents. L'intuition est la suivante : **les agents plus averses au risque vont s'auto-protéger et auront donc moins besoin d'incitations**. Alors, l'incitation à l'effort de l'agent (en l'occurrence, dans leur modèle, la part des pertes totales imputée à l'agent) décroît

avec son niveau d’aversion au risque et croît avec le caractère incitatif du contrat de réservation.

Même si la démonstration n’est pas faite ici, les conclusions de l’article de Jullien et al. (2000) devraient être applicables dans le cadre d’un menu d’assurance proposé aux agriculteurs, et en particulier les agriculteurs devraient choisir des niveaux de protection croissants avec leur niveau d’aversion au risque et avec l’incertitude sur la ressource.

3.4 Evaluation des règles selon les critères prédéfinis

Par rapport aux 5 critères définis page 121, les résultats sont les suivants.

Critère 2) La mise en culture d’une surface totale correspondant à la tolérance collective au risque.

Pour tous les mécanismes d’allocation étudiés, il est possible de choisir les paramètres (prix de l’eau, niveau d’assurance) de façon à obtenir la surface totale qui correspond à la tolérance collective au risque.

1 et 3) La mise en place de mécanismes de partage de risque et la valorisation maximale à surface et volume collectif donnés

La valorisation maximale à surface donnée est atteinte par des allocations de type *ex post*. Cela dit, les mécanismes d’assurance, en limitant les risques, réduisent l’hétérogénéité au sein du groupe d’agriculteurs et par là les différences de surfaces mises en culture et les différences de valorisation.

Le critère de partage de risque aboutit au même classement : les allocations de types *ex post* vérifient les conditions de partage optimal tandis que les assurances extérieures couplées à une allocation *ex ante* donnent un partage de risque bon mais non optimal (figure 3.7).

		allocation	
		<i>ex ante</i>	<i>ex post</i>
taxation	linéaire au volume		
	marché		
	linéaire à la surface		
	assurances		

FIG. 3.7 – critères de partage de risque et de valorisation optimale (noir = optimal, gris = effet positif)

4) La diminution de la variabilité inter-annuelle des revenus

Les mécanismes qui diminuent la variabilité inter-annuelle sont ceux qui permettent d’avoir un excédent global lorsque le volume collectif est important, excédent reversé pendant les années de sécheresse. Les marchés ne peuvent jouer ce rôle et la taxe à la surface conduit à des prélèvements qui sont constants. La tarification au volume et les mécanismes d’assurance peuvent, en revanche, diminuer cette variabilité inter-annuelle (fig. 3.8).

		allocation	
		<i>ex ante</i>	<i>ex post</i>
taxation	linéaire au volume		
	marché		
	linéaire à la surface		
	assurances		

FIG. 3.8 – critère de diminution de la variabilité inter-annuelle des revenus

5) L'équité dans l'allocation de l'eau

En cas d'allocation *ex post* avec tarification au volume, si le prix p est faible et si la surface totale est plus grande qu'avec un marché, les agriculteurs les moins averses au risque, en mettant une surface plus importante en culture, se créent des rentes par rapport aux agriculteurs plus averses. Ces rentes seront considérées comme inéquitables par rapport à la situation d'allocation initiale *ex ante*. Il existe en fait deux possibilités pour rendre équitable une allocation de type *ex post* avec tarification au volume.

- Soit les agriculteurs prennent des risques à tour de rôle. C'est le cas en Tunisie du fait des contraintes de rotation culturale. C'est ce manque de rotation qui a été à l'origine de l'abandon des exceptions aux interdictions de prélèvement pour certaines cultures sur l'Adour. L'utilité des agriculteurs est alors plus importante *en moyenne* qu'avec l'allocation *ex ante* de référence.

- Soit les agriculteurs perçoivent la part de la taxe collectée qui correspond à leur droit initial, le profit étant alors $\pi(s) = s \left[\left(r \left(\frac{V}{S} \right) - k - \frac{pV}{S} \right) \right] + p\lambda_{i0}V$ ou bien par le biais du marché *ex post*.

La figure (3.9) établit un bilan de l'équité des différentes règles étudiées.

		allocation	
		<i>ex ante</i>	<i>ex post</i>
taxation	linéaire au volume		
	marché		
	linéaire à la surface		
	assurances		

FIG. 3.9 – équité de la règle d'allocation (noir pour équité optimale, blanc pour équité possible)

3.5 Applications sur l'Adour et en Tunisie

3.5.1 Des usages hétérogènes sur l'Adour

Une mauvaise répartition du risque entre les usages

Le bassin de l'Adour fait partie des quelques régions de France qui connaissent à la fois une irrigation importante et une ressource en eau très variable. L'augmentation très récente de l'irrigation a mis en défaut le système de régulation existant. Jusqu'à maintenant, dans les zones en gestion réglementaire :

- les agriculteurs irriguent presque partout toute leur surface irrigable ;
- le débit réservé théoriquement à l'environnement absorbe la plus grande partie de la variabilité sur la ressource.

Pour toutes les rivières françaises qui connaissent des problèmes de débit d'étiage, deux débits de référence ont été définis. Le Débit Objectif d'Etiage (DOE) traduit le compromis souhaité entre les différents usages ; il doit être respecté 4 années sur 5. L'autre débit de référence est le Débit de Crise (DCR) qui définit la limite en deçà de laquelle l'écosystème peut être considéré comme en danger. Si le débit passe en dessous de cette valeur, toute activité d'irrigation doit être arrêtée. Par conséquent, la répartition théorique de l'eau entre usage agricole et usage environnemental se fait comme sur la figure (3.10).

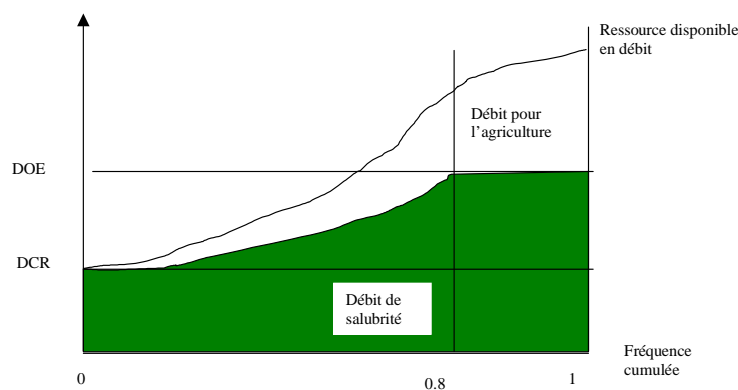


FIG. 3.10 – schéma de la répartition théorique du risque entre usages sur l'Adour en période d'étiage

En pratique, le rapport de forces actuel, dans les zones en gestion réglementaire est plutôt celui de la figure (3.11).

Trois raisons peuvent être avancées pour expliquer ce déséquilibre.

- La surprime pour l'irrigation ² de la PAC incite les agriculteurs à mettre en culture une surface maximale, surface dont ils espéreront obtenir, dans un deuxième temps, un bon rendement.
- Techniquement, les outils d'allocation sont fondés sur la valeur du débit en des points particuliers. Les agriculteurs prélèvent individuellement dans la rivière, tous les outils de contrôle utilisent une mesure agrégée des consommations et conduisent à des équilibres de Nash de surconsommation d'eau agricole (voir chapitre 4).

²ou "compensation" selon le point de vue considéré

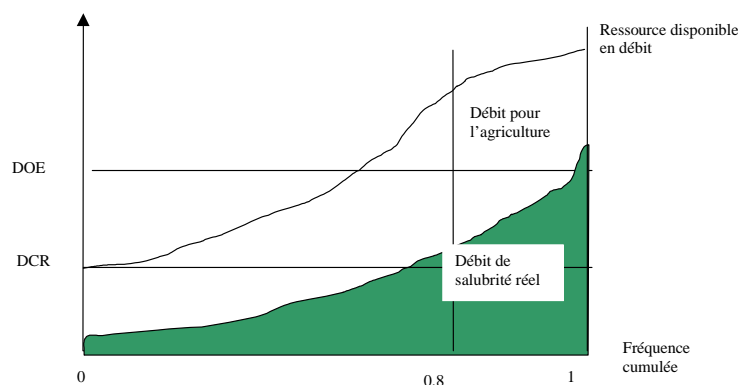


FIG. 3.11 – schéma de la répartition réelle du risque entre usages sur l'Adour en période d'étiage

- En cours de campagne, une fois les assolements réalisés, le poids politique des agriculteurs ainsi que la valeur de l'eau consacrée à l'irrigation conduisent à un arbitrage en faveur de ces derniers.

On peut envisager deux mécanismes pour éviter ce déséquilibre.

Un mécanisme d'assurance

Peut-on envisager une assurance "eau", gérée par exemple par les Chambres d'Agriculture ? Avec un tel système, les agriculteurs arrêtent d'irriguer lorsque le débit de la rivière est bas et ils perçoivent des indemnités correspond à la valeur perdue. On pourrait envisager que l'Etat prenne en charge une partie des primes, comme cela se fait aux Etats-Unis.

Des marchés de droits

Un marché d'option serait intéressant car sur l'Adour les usages sont très différents : après une répartition initiale des droits entre les différents usages, l'Etat peut acheter des options sur les droits de prélèvement des agriculteurs pour assurer un débit minimal dans la rivière pendant les périodes de grande sécheresse.

Un début de formalisation du risque sur le bassin de l'Adour

L'incertitude sur la ressource en eau est progressivement intégrée dans les dispositifs de gestion sur le bassin de l'Adour. Le Plan de Gestion des Etiages, signé en 1999 par la quasi-totalité des acteurs concernés, donne les valeurs actuelles des DOE et leurs valeurs futures suite à la création de retenues (Institution Adour, 1999). Ces DOE doivent être respectés 4 années sur 5. De plus, le PGE prévoit aussi que les autorisations de prélèvement soient désormais assorties du quota d'eau disponible 4 années sur 5 et 1 année sur 2. Même si ces quotas n'ont pas de valeur juridique, leur utilisation illustre bien la diffusion progressive de l'idée d'une gestion *statistique* des débits. De même, la CACG gère le système Neste avec une probabilité de pénurie de 1 année sur 10.

3.5.2 Prises de risque individuelles et collectives dans les GIC tunisiens

Du fait de la variabilité des pluies et des nombreux problèmes techniques sur les pompes, la gestion du risque est un élément majeur pour les petits périmètres irrigués en Tunisie Centrale.

L'étude cherche à comprendre ici quel niveau de risque collectif correspond au choix d'assolement sur un périmètre, compte-tenu du réseau et de la règle de distribution. On n'a pas essayé ici d'estimer des tolérances individuelles au risque qui auraient pu permettre de calculer la tolérance collective et le niveau optimal de prise de risque : il semble extrêmement difficile, compte-tenu de la diversité des exploitations et des réseaux existants de partage de risque, de réussir à estimer l'aversion au risque d'un agriculteur relativement à son choix d'assolement.

L'étude s'est restreinte à l'analyse de l'assolement sur l'ensemble du périmètre. On cherche dans un premier temps à estimer si les surfaces totales mises en culture à El Melalsa et Souaidia constituent une prise de risque importante compte tenu de la règle de répartition actuelle : règle de type *ex post* avec durée individuelle libre à El Melalsa, règle de type *ex ante* à Souaidia. On reste à l'échelle globale du périmètre, en considérant par exemple l'existence de trois grands champs sur le périmètre d'El Melalsa : un de fève-piment, un autre de blé et un dernier de melon. Pour un type de règle donné et une année pluviométrique donnée le résultat sur le rendement des cultures est simulé, ce qui permet d'obtenir la valorisation totale sur l'ensemble du périmètre. Pour El Melalsa, les rendements obtenus si on utilisait une règle d'allocation de type *ex ante* ont, eux aussi, été calculés.

Un assolement total à El Melalsa trop risqué pour la règle choisie

Pour El Melalsa, la règle de tour d'eau avec durée individuelle libre a d'abord été simulée, avec le tableur Bilhy (voir p. 110).

Par définition, un assolement "sûr" est celui pour lequel les plantes sont correctement irriguées en année moyenne avec une irrigation lorsque la réserve du sol devient inférieure à 0.85 fois la Réserve Utile. L'assolement obtenu est de 40 ha de blé, 20 de piment-fève et 15 de melon. Pour l'assolement risqué, on retiendra l'assolement réalisé en 98-99 (60 ha de blé, 21 de piment-fève et 27 de melon et pastèque).

Le choix possible entre deux règles d'allocation et deux types d'assolement aboutit à quatre scénarios différents. Sur la figure (3.12), la partie de gauche donne la définition de ces quatre scénarios tandis que celle de droite donne les valorisations totales calculées selon les quatre pluviométries : années quinquennales sèche et humide, année moyenne et année 98-99 (l'étude faite à partir des bilans hydriques permet d'estimer, de façon approximative, que le profit total réalisé cette année n'a pas dépassé les 50 000 DT).

On peut tirer quatre remarques principales.

- **L'assolement "sûr" donne toujours un revenu à la fois de moyenne et de variance plus faible que l'assolement "risqué",** ce qui est attendu.
- La règle de tour d'eau avec durée individuelle libre fait aussi bien voire mieux que la règle de répartition journalière en année moyenne ou humide. En effet, cette règle permet de mieux jouer sur la réserve du sol, puisque il a été choisi une règle très prudente pour l'irrigation journalière (un seuil de déclenchement de 0.85 fois la Réserve utile).

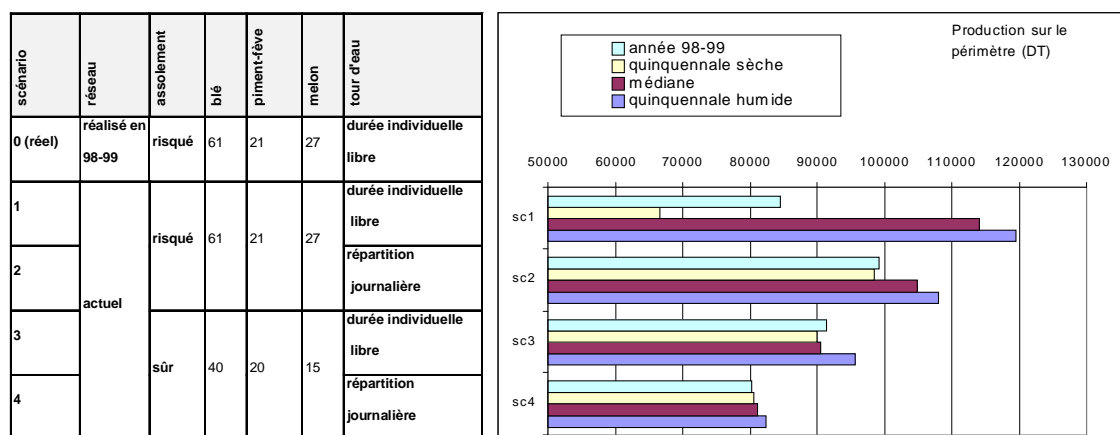


FIG. 3.12 – valorisation totale à El Melalsa suivant l'assolement collectif total, la règle d'allocation et la pluviométrie

Avec cette règle prudente, les réservoirs sont toujours bien remplis et donc cette règle ne permet pas de profiter complètement de la pluie. En revanche, **en année sèche et avec un assolement “risqué”, la règle de tour d'eau avec durée individuelle libre se révèle très mauvaise, pour deux raisons : d'abord parce que la durée du tour d'eau devient trop importante, ensuite parce qu'on ne peut pas alors mettre en place de mécanismes de priorité entre les cultures.**

- Avec la règle actuelle de répartition de l'eau, l'assolement réellement fait en 98-99 est un assolement très risqué. La comparaison des scénarios 1 et 3 montre qu'une diminution de la surface aurait permis de limiter beaucoup plus les pertes en année sèche.

- Les scénarios 2 et 4 montrent qu'en revanche, pour un tour d'eau à répartition journalière, l'assolement “risqué” est toujours préférable à l'assolement “sûr”.

En 98-99, l'année a été sèche pour les cultures maraîchères. Dans l'ensemble, la pluie totale est comprise entre une année quinquennale sèche et une année moyenne (figure 3.14 en annexe du chapitre). Une analyse au pas de temps du mois montre que **la période de février à mai 1999 a été particulièrement sèche** (figure 3.15 : la colonne de droite indique le classement du mois de l'année 98-99 par rapport à l'ensemble des 18 années recensées).

L'assolement collectif n'est pas trop important a priori, puisqu'il apporte plus en année médiane qu'un assolement moins risqué. Cela dit, compte tenu de la règle de répartition, cet assolement a abouti à un risque collectif important. **Comme pour McCarthy (2001), la “Tragédie des Communs” ne se traduit pas ici par une baisse de la valorisation moyenne, mais correspond à une trop grande prise de risque.** On pourrait penser que le risque global a été imposé par les agriculteurs les moins avertis au risque qui a prévalu, par exemple ceux qui possèdent un puits hors du périmètre. En fait, ceux qui ont un puits hors du périmètre (le type A du chapitre 2), mettent en moyenne seulement 11% de leur surface en périmètre en melon (plus précisément 15% pour ceux au-dessus du seuil de 0.45 et 0 en dessous). Quant à ceux qui n'ont pas de puits hors du périmètre (le type B), ils mettent 29% en moyenne (36 % au dessus du seuil et 0% en dessous).

Ce sont donc les agriculteurs proches du réseau et qui n'ont pas de puits qui sont les principaux acteurs de la trop grande prise de risque. En effet, si les agriculteurs qui ont un puits hors du périmètre sont moins averses au risque, ils sont en revanche limités par la main d'œuvre. Ils préfèrent en fait investir dans le maraîchage hors du périmètre, ce qui leur permet d'avoir de l'eau plus facilement et à un coût bien moindre.

Une bonne prise de risque collective à Souaidia

De même, deux simulations d'assolement global pour Souaidia ont été effectuées. L'assolement de l'année 98-99 était constitué de 48 ha de blé et 57 de piment : un assolement moins risqué (48 blé, 50 piment) et un assolement plus risqué (60 de blé et 60 de piment) ont été simulés. Dans la région de Souaidia, on peut considérer l'année 98-99 comme plutôt de pluviométrie moyenne dans son ensemble (voir figure 3.16 en annexe).

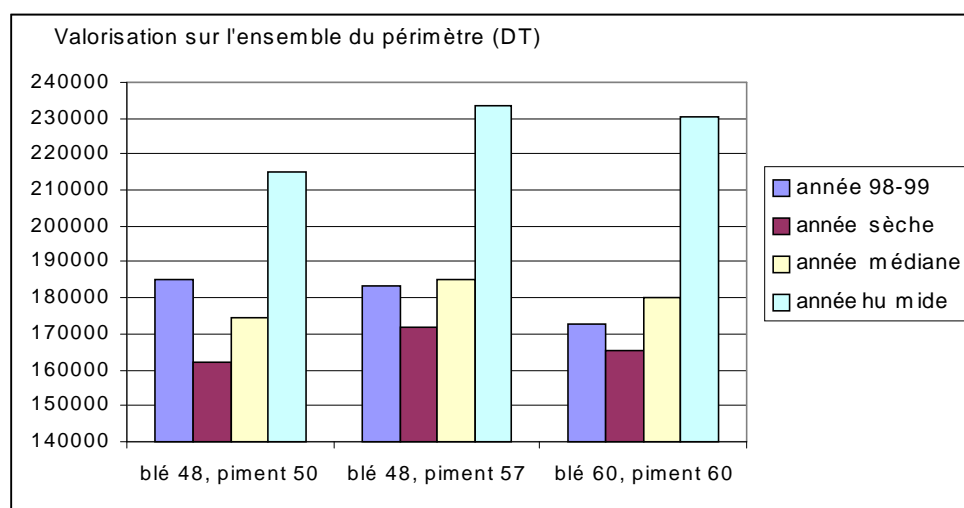


FIG. 3.13 – valorisation totale à Souaidia suivant l'assolement collectif total et la pluviométrie

Avec cette simulation, l'assolement composé de 48 ha de blé et 57 ha de piment, avec la pluie de l'année 98-99, aboutit à un ratio rendement réel/rendement potentiel de 95% pour le blé et 51% pour le piment. L'assolement total choisi correspond à un bon risque collectif : il n'y a même rien à attendre, même en moyenne, à augmenter la superficie irriguée (fig. 3.13).

3.6 Conclusion

Pour comparer différentes règles d'allocation de l'eau en univers incertain, 5 critères ont été définis et des conditions de partage optimal du risque ont été caractérisées.

On a présenté un panel de l'ensemble des règles d'allocation possibles pour répartir l'eau entre différents agriculteurs autonomes dans leur choix d'assolement, lorsque la ressource collective disponible est incertaine.

Il apparaît qu'aucune allocation ne permet d'atteindre complètement les 5 objectifs affichés : selon les priorités affichées par la Collectivité, il sera intéressant d'utiliser tel ou tel mécanisme.

De plus, l'impact de la règle d'allocation sur la surface totale mise en culture peut être jugé positif ou négatif au niveau de la Collectivité. De façon très schématique, dans les pays du Nord les mécanismes de partage de risque risquent de créer un surassolement tandis que dans les pays du Sud, ces mécanismes pourraient permettre d'atteindre une mise en culture totale plus importante et meilleure pour la Collectivité.

Toute règle reposant sur une allocation de l'eau de type *ex post*, i.e. proportionnelle aux besoins, permet à la fois de valoriser l'eau au mieux à volume et surface donnés, et de réaliser un partage optimal du risque. Cependant, une allocation de type *ex post* avec tarification au volume peut conduire à une Tragédie des Communs de surassolement, qui peut ne pas se traduire par une baisse de la productivité moyenne mais qui se traduira par une trop grande prise de risque collective. **Lorsqu'il y a une rotation entre les agriculteurs pour la prise de risque et lorsque la Collectivité peut assurer un contrôle des surfaces mises en culture de façon à minimiser la prise de risque collective, le partage de risque par le biais de l'allocation de la ressource en eau peut être efficace...**, mais, bien sûr, en envisageant un contrôle possible par la Collectivité des surfaces mises en culture, on quitte le dilemme initial. La règle *ex post* sera aussi intéressante, par conséquent, lorsque des caractéristiques techniques, telles que la superficie irrigable, viennent limiter les opportunités de surassolement.

Signalons aussi l'existence de systèmes hybrides, tels que l'assurance agricole au Japon. Le Japon comporte 2500 coopératives qui mutualisent en leur sein les risques, mais qui sont aussi réassurées au niveau des préfectures, elles-mêmes réassurées par un organisme public (C.E.S, 1998).

Hormis l'objectif de diminution de la variabilité inter-annuelle des revenus, les marchés sont les mécanismes les plus efficaces. Un marché *ex ante* peut être utilisé lorsque les agriculteurs ne connaissent pas bien le système total (au début de la mise en place d'un marché par exemple) ou bien lorsque les productions varient beaucoup d'une année à l'autre. Les marchés de droits prioritaires ont beaucoup d'intérêt lorsque les usagers sont différents, par exemple des agriculteurs et des collectivités dont le besoin est constant et incompressible. Le marché *ex post* est en fait très proche des marchés contingents complets sur le volume collectif et la surface totale si on suppose que les agriculteurs peuvent estimer correctement la surface totale qui va être mise en culture.

La mise en application des marchés est actuellement facilitée par la baisse des coûts de transaction. Si les marchés *ex ante* et *ex post* ont existé dans certaines régions à de petites échelles, les nouvelles technologies de circulation de l'information permettent

de les étendre à des bassins beaucoup plus vastes, tels que l'ensemble de la vallée du Colorado en Californie avec la California Drought Emergency Bank. **Cependant, en France, la mise en place d'un marché bute sur la définition de la situation initiale et par là des droits à irriguer : les agriculteurs estiment avoir de fait un droit de prélèvement tandis que, pour le Ministère de l'Environnement, la situation initiale est celle d'une rivière sans prélèvements. De plus, le Ministère veut pouvoir interrompre les autorisations d'irrigation en période de sécheresse.**

Le principal intérêt des mécanismes d'assurance actuels est de diminuer la variabilité inter-annuelle des revenus (en plus du fait d'ajouter un agent très peu averse au risque). Ces mécanismes conduisent néanmoins systématiquement à une augmentation de la surface mise en culture. Ces mécanismes sont toujours, en pratique, fondés sur des allocations *ex ante*. En ce qui concerne leur mise en œuvre, ils présentent des problèmes d'aléa moral sur les pertes déclarées et la conduite de culture en cours de campagne, problèmes qui peuvent être résolus en partie par une assurance par zone. De plus, puisque le risque est global, il faut des compagnies d'assurance suffisamment importantes pour pouvoir supporter ce risque, ou bien utiliser les marchés financiers.

L'autre intérêt évident d'un mécanisme extérieur est d'ajouter au système initial un agent très peu averse au risque. Pour Arnott et Stiglitz (1991), il y a ainsi **un dilemme général entre une assurance extérieure qui est plus efficace qu'une mutuelle entre agents quant au partage du risque, et le fait que les agents contrôlent plus facilement entre eux leur prise de risque individuelle.**

D'autres mécanismes de partage du risque

Dans de nombreux systèmes irrigués, le partage de risque par la ressource en eau ne fait que compléter d'autres mécanismes existants.

Le premier d'entre eux est le crédit accordé par le trésorier si un agriculteur ne parvient plus à financer le coût de l'eau pendant la campagne d'irrigation. Cette possibilité de crédit existe dans tous les GIC mais le trésorier doit être très attentif à récupérer les sommes prêtées en fin de campagne. Pour le trésorier de Bled Abida, **le crédit sert aussi à éviter que les agriculteurs les plus riches n'accaparent le tour d'eau en déposant leur mandat bien avant ceux qui ont des problèmes d'argent.**

La première AIC qui a fonctionné à Bled Abida de 1997 à 1998 a ainsi dû être mise en liquidation parce qu'un montant trop important de dettes non remboursées s'était accumulé. Pour le président de Souaidia, la règle de limitation à 1/3 de surfaces pendant l'été permet aussi que l'agriculteur ne prenne pas trop de risque et puisse financer toute sa campagne.

Le partage de risque se fait aussi par différents types de contrats de location. A Souaidia, si le propriétaire participe aux investissements, il perçoit 50% de la production, sinon il n'obtient qu'un tiers. Dans la région d'El Melsalsa, lorsque le puits peut fournir plus d'eau que les terres du propriétaire n'en ont besoin, il existe deux systèmes :

- soit l'agriculteur qui souhaite obtenir l'eau du puits cède pour la campagne la moitié de ses terres au propriétaire en échange de l'eau ;
- soit le propriétaire reçoit un cinquième de la recette.

Enfin, une règle valable traditionnellement dans toute la Tunisie est la règle du 1/5^{ème} : un ouvrier qui cultive une terre ne lui appartenant pas et qui ne paie pas les intrants

recevra un cinquième de la récolte. Ces ouvriers sont appelés les “hammes” (de *hamsa*, 5 en arabe) (voir Feuillette, 2001, pour une présentation générale des différentes formes de faire-valoir dans la région).

3.7 Conclusion sur les règles qui créent des interdépendances dans le cas d'une méconnaissance des caractéristiques individuelles

Les chapitres 2 et 3 ont posé la question de l'intérêt des règles créant une interdépendance dans le cas où une caractéristique individuelle - nécessaire pour connaître l'allocation optimale - était inconnue du Gestionnaire.

Ces règles peuvent-elles donc être efficaces, au sens où elles permettent d'atteindre les objectifs définis par la Collectivité ? Il a été montré que ces règles :

- **permettent un partage efficace du risque** ;
- **peuvent bien valoriser l'eau**, en fonction du degré d'hétérogénéité du groupe en ce qui concerne la capacité à valoriser l'eau ;
- mais peuvent souvent être considérées comme inéquitables.

En fait, dans ce cas où le Gestionnaire ne connaît pas une caractéristique des irrigants, ces règles *ex post* peuvent fonctionner comme des mécanismes de révélation indirecte. Elles peuvent inciter les agriculteurs les plus compétents, ou bien ceux qui ont les meilleurs sols, à mettre plus en culture, et de cette façon à révéler leur type, mais pour ce faire, il faut que ces agriculteurs en tirent certains avantages, d'où des problèmes éventuels d'équité.

Néanmoins, deux allocations sont apparues comme efficaces, au sens où elles permettent de bien valoriser l'eau, de partager le risque et d'être équitables :

- o la **une rotation entre agriculteurs** identiques du fait de contraintes culturelles ;
- o l'allocation *ex post* **couplée à une taxe importante**, taxe qui est ensuite redistribuée selon les critères d'équité désirés.

3.8 Annexes du chapitre 3

Démonstration de la proposition 3-1 : choix d'un agriculteur seul

L'agriculteur choisit la surface s à mettre en culture irriguée de façon à maximiser la fonction W suivante :

$$W(s) = EU \left[s \left(r\left(\frac{V}{s}\right) - k \right) - pV \right]$$

Alors $W'(s) = E \left[U'(\pi) \left(r\left(\frac{V}{s}\right) - k - \frac{V}{s} r'\left(\frac{V}{s}\right) \right) \right]$.
 $W''(s) = E \left[U'(\pi) \left(\frac{V}{s^2} r''\left(\frac{V}{s}\right) + U''(\pi) \left(r\left(\frac{V}{s}\right) - k - r'\left(\frac{V}{s}\right) \right)^2 \right) \right] < 0$ par concavité de r et de U . Il y a donc une seule surface qui permet de maximiser l'espérance d'utilité.

La démonstration suivante de l'influence de l'aversion au risque sur les choix d'assolement est analogue à celle de Pope et Kramer (1979), elle est fondée sur le fait que la dérivée seconde croisée du profit $\frac{\partial^2 \pi}{\partial s \partial V}$ est positive.

Soient deux agents U et V, tels que V soit plus averse au risque que U. Alors les fonctions vNM d'utilité des deux agents vérifient $V = g(U)$ où g est une fonction concave. La surface s_u^* choisie par l'agriculteur U vérifie :

$$E \left[U'(\pi) \left(r\left(\frac{V}{s_u^*}\right) - k - \frac{V}{s_u^*} r'\left(\frac{V}{s_u^*}\right) \right) \right] = 0 \quad (3.3)$$

Lorsqu'on évalue la condition de premier ordre de l'agriculteur V avec la surface s_u^* on obtient :

$$A = E \left[g'(U(\pi)) U'(\pi) \left(r\left(\frac{V}{s_u^*}\right) - k - \frac{V}{s_u^*} r'\left(\frac{V}{s_u^*}\right) \right) \right] \quad (3.4)$$

De plus, $\frac{\partial \pi}{\partial V} = r'\left(\frac{V}{s}\right) > 0$ par conséquent π est croissant en V donc $U(\pi)$ est croissant en V donc $g'(U(\pi))$ est décroissant en V . D'autre part $U'(\pi)$ est positif et puisque

$$\frac{\partial}{\partial V} \left(r\left(\frac{V}{s}\right) - k - \frac{V}{s} r'\left(\frac{V}{s}\right) \right) = -\frac{V}{s^2} r''\left(\frac{V}{s}\right) > 0$$

les termes négatifs de l'intégrale nulle (3.3) se trouvent sur la partie "gauche" de l'intégrale, pour les volumes V petits. Enfin, puisque la différence entre les équations (3.3) et (3.4) consiste à ce que, par le biais de $g'(U(\pi))$, plus de "poids" est donné aux volumes faibles, on en déduit que $A < 0$.

Par conséquent, puisque W est concave, $s_v^* > s_u^*$.

Démonstration de la proposition 3-2 : marché *ex ante*

L'agriculteur reçoit ici un profit : $\pi(s_i) = s_i \left[r\left(\frac{\lambda_i V}{s_i}\right) - k \right] - p\lambda_i$

Posons $\varrho_i = \frac{\lambda_i}{s_i}$. Il est équivalent alors de considérer que l'agriculteur maximise à la fois sur ϱ_i et sur s_i la fonction suivante :

$$EU_i [s_i (r(\varrho_i V) - k_p \varrho_i)]$$

Le premier ordre en ϱ_i donne :

$$E[s_i(Vr'(\varrho_i V) - p)U'_i(\pi_i)] = 0 \quad (3.5)$$

Le premier ordre en s_i donne :

$$E[(r(\varrho_i V) - k - p\varrho_i)U'_i(\pi_i)] = 0 \quad (3.6)$$

On multiplie l'équation (3.5) par ϱ_i , on la divise par s_i puis on soustrait l'équation résultante à (3.6). Il vient :

$$E[(r(\varrho_i V) - k - V\varrho_i Vr'(\varrho_i V))U'_i(\pi_i)] = 0 \quad (3.7)$$

Cette équation permet de se placer dans le cadre de la démonstration précédente, en remplaçant ϱ_i par $\frac{1}{s_i}$, ce qui prouve que plus un agriculteur i est averse au risque, plus le facteur ϱ_i est important.

D'autre part :

$$\begin{aligned} d\pi &= \lambda_i r'(\varrho_i V) dV \\ dz &= \sum_j = \lambda_j r'(\varrho_j V) dV \end{aligned}$$

Donc $\frac{d\pi_i}{dz}$ n'est pas linéaire : il n'y a pas de partage optimal du risque.

De plus, on n'atteint pas la valorisation optimale *ex post* puisque les agriculteurs ont choisi des volumes à l'hectare $\varrho_i V$ différents, en fonction de leur aversion au risque (figure 3.3). Le marché *ex ante* ne permet donc pas de se passer d'un marché *ex post*.

Démonstration de la proposition 3-3

Puisque, par hypothèse, l'agriculteur a un indice absolu d'aversion au risque constant :

$$u'(w_0 + \pi) = u'(w_0) - I_a \pi u'(w_0) + \pi^2 \epsilon(\pi)$$

avec $\epsilon(\pi)$ tendant vers 0 avec π . La condition de premier ordre est alors :

$$\int_V \frac{\partial \pi}{\partial s} (1 - I_a \pi + \frac{\pi^2 \epsilon(\pi)}{u'(w_0)}) = 0$$

Or $\frac{\partial \pi}{\partial s} = \int_V [r(\frac{V}{S}) - k - \frac{pV}{S}]$ ne dépend pas de s_i et si, au premier ordre, on néglige le terme en $\frac{\epsilon(\pi)}{u'(w_0)}$:

$$\int_V \left[r(\frac{V}{S}) - k - \frac{pV}{S} \right] \left[I_a s_i (r(\frac{V}{S}) - k - \frac{pV}{S}) - 1 \right] \simeq 0$$

d'où

$$s_i \simeq \min \left(s_m; T_i \frac{\left[\int_V r(\frac{V}{S}) - \frac{pV}{S} \right] - k}{\int_V (r(\frac{V}{S}) - k - \frac{pV}{S})^2} \right)$$

Le numérateur $[\int_V r(\frac{V}{S}) - k - \frac{pV}{S}]$ est le rendement moyen à l'ha (constant pour tous avec ce type d'allocation), et $\int_V (r(\frac{V}{S}) - k - \frac{pV}{S})^2$ est le moment d'ordre 2 de ce rendement.

De plus, avec $Esp(X^2) = Var(X) + (Esp(X))^2$, on est donc bien avec un arbitrage Espérance-Variance :

$$s_i \simeq \text{Min} \left(s_m, \text{Tolérance} * \frac{\text{Espérance du profit}}{\text{Variance du profit} + \text{Espérance du profit}^2} \right)$$

Enfin, posons $A = \frac{[\int_V r(\frac{V}{S}) - k - \frac{pV}{S}]}{\int_V (r(\frac{V}{S}) - k - \frac{pV}{S})^2}$.

L'allocation *ex post* conduit à un partage optimal du risque puisque, à assolement donné, $\frac{d\pi}{dZ} = \frac{T_i dA}{T dA} = \frac{T_i}{T}$ qui correspond aux conditions nécessaires de Arrow-Borsch.

Démonstration de la proposition 3-4

La condition de premier ordre sur W_i s'écrit : $q(V, S) = r'(\frac{W_i}{s_i})$ d'où

$\frac{W_i}{s_i} = \frac{V}{S}$ et $q(V, S) = r'(\frac{V}{S})$.

Le profit se réécrit alors :

$$\pi(s_i) = s \left[r\left(\frac{V}{S}\right) - k \right] - r'\left(\frac{V}{S}\right) \left(\frac{V}{S} s_i - W_{iO}(V) \right) = s_i \left[r\left(\frac{V}{S}\right) - k - r'\left(\frac{V}{S}\right) \frac{V}{S} \right] + r'\left(\frac{V}{S}\right) W_{iO}(V)$$

On se retrouve dans un cas semblable à l'allocation *ex post* taxée au volume :

$$s_i = \min \left(s_m; T_i \frac{\int_V \left[r\left(\frac{V}{S}\right) - k - r'\left(\frac{V}{S}\right) \frac{V}{S} \right] (1 - \frac{V}{S} W_{iO})}{\int_V (r\left(\frac{V}{S}\right) - k - r'\left(\frac{V}{S}\right) \frac{V}{S})^2} \right)$$

Si l'allocation initiale est identique pour tous les agriculteurs, le partage du revenu se fait aussi proportionnellement aux tolérances T_i . S'il n'y a pas de limite sur les surfaces, lorsque T devient grand on tend vers la surface d'un seul agriculteur neutre au risque. De la même façon que pour l'allocation *ex post*, le marché *ex post* vérifie au premier ordre les conditions d'Arrow-Borsch de partage optimal du risque.

Enfin, montrons que pour une tolérance au risque suffisamment grande, le marché *ex post* permet de diminuer la surface totale mise en culture par rapport à l'allocation *ex post* taxée au volume.

Posons $f(S) = T \left(\int r\left(\frac{V}{S}\right) - k - p\frac{V}{S} \right) - S \int \left(r\left(\frac{V}{S}\right) - k - p\frac{V}{S} \right)^2$

La fonction f s'annule donc pour $S = S_{exp}$, la surface atteinte pour l'allocation *ex post* taxée au volume.

Alors $f'(S) = -T \int \frac{V}{S^2} r'\left(\frac{V}{S}\right) - \int \left(r\left(\frac{V}{S}\right) - k - p\frac{V}{S} \right)^2 - 2S \int \left(r\left(\frac{V}{S}\right) - k \right) \left(-\frac{V}{S^2} (r'\left(\frac{V}{S}\right) - p) \right)$

$f'(S) = - \int \left(r\left(\frac{V}{S}\right) - k - p\frac{V}{S} \right)^2 - \int \frac{V}{S^2} r'\left(\frac{V}{S}\right) (T - 2Sr\left(\frac{V}{S}\right) + 2k) + 2pS \int \left(r\left(\frac{V}{S}\right) - k \right)$

Pour T grand, f est strictement décroissante.

De plus, la surface totale du marché *ex post* S_{mex} vérifie :

$$T \left(\int r\left(\frac{V}{S_{mex}}\right) - k - \frac{V}{S_{mex}} r'\left(\frac{V}{S_{mex}}\right) \right) - S_{mex} \int \left(r\left(\frac{V}{S_{mex}}\right) - k - \frac{V}{S_{mex}} r'\left(\frac{V}{S_{mex}}\right) \right)^2 = 0$$

D'où

$$\begin{aligned}
f(S_{mex}) &= T \int \frac{V}{S_{mex}} (r'(\frac{V}{S_{mex}}) - p) + S_{mex} \int \left(r(\frac{V}{S_{mex}}) - k - \frac{V}{S_{mex}} r'(\frac{V}{S_{mex}}) \right)^2 - S_{mex} \int \left(r(\frac{V}{S_{mex}}) - k - p \frac{V}{S} \right)^2 \\
&= T \int \frac{V}{S_{mex}} (r'(\frac{V}{S_{mex}}) - p) + S_{mex} \int \left(2r(\frac{V}{S_{mex}}) - 2k - \frac{V}{S_{mex}} r'(\frac{V}{S_{mex}}) \right) \left(-\frac{V}{S_{mex}} r'(\frac{V}{S_{mex}}) \right) \\
&= \int \frac{V}{S_{mex}} (r'(\frac{V}{S_{mex}}) - p) \left(T - S_{mex} (2r(\frac{V}{S_{mex}}) - 2k - \frac{V}{S_{mex}} r'(\frac{V}{S_{mex}}) - p) \right)
\end{aligned}$$

Par conséquent, $f(S_{mex}) > 0$ lorsque T est grand et le prix est faible devant $r'(\frac{V}{S_{mex}})$. Donc, pour T suffisamment grand, $S_{mex} < S_{exp}$, la surface totale pour une allocation *ex post* taxée au volume.

Calculs avec la fonction de rendement de forme hyperbolique

Allocation *ex ante*

Pour un agriculteur averse au risque :

$$u(w + s_i r(\frac{\lambda_i V}{s_i}) - k s_i - p \lambda_i V) = u(w + s_i - \frac{s_i^2}{\lambda_i V} - k s_i - p \lambda_i V)$$

Pour un agriculteur neutre au risque, $s_i = \lambda_i \frac{1-k}{2 \int_V \frac{1}{V}}$, donc pour un agriculteur averse au risque $\frac{s_i}{\lambda_i V} < \frac{1-k}{2}$ et on estime pouvoir négliger dans les calculs suivants les termes en s_i^3 et s_i^4 . Alors, à l'ordre 2 en s_i :

$$u(w + s_i r(\frac{\lambda_i V}{s_i}) - k s_i - p \lambda_i V) = u(w) + s_i [1 - k - \frac{s_i}{\lambda_i V}] u'(w) + s_i^2 (1 - \frac{s_i}{\lambda_i V} - k)^2 \frac{u''(w)}{2}$$

$$EU_i = u(w) + s_i [1 - k - \int_V \frac{s_i}{\lambda_i V}] u'(w) + s_i^2 (1 - k)^2 \frac{u''(w)}{2}$$

D'où $\frac{d}{ds_i} EU_i = (1 - k - 2s_i \int_V \frac{1}{\lambda_i V}) u'(w) + s_i (1 - k) u''(w) = 0$. Il vient :

$$1 - k - 2s_i \int_V \frac{1}{\lambda_i V} = I_a(w) s_i (1 - k)$$

et en utilisant la partie précédente : $1 - \frac{s_i}{\lambda_i S_N} = I_a(w) s_i$. On tire :

$$s_i = \frac{1}{I_a(w) + \frac{1}{\lambda_i S_N}} = \frac{\lambda_i S_N}{1 + \lambda_i I_a S_N} = \frac{\lambda_i T_i S_N}{T_i + \lambda_i S_N}$$

On retrouve bien, pour un agriculteur neutre au risque et avec $\lambda_i = 1$, le résultat précédent. Pour T_i petit $s_i \simeq T_i$ Pour T_i grand $s_i \simeq \lambda_i S_N$. La surface totale mise en culture est alors :

$$S = \sum_i \frac{\lambda_i S_N}{1 + \lambda_i I_{ai} S_N} = \sum_i \frac{T_i \lambda_i S_N}{T_i + \lambda_i S_N} < \sum_i \lambda_i S_N = S_N$$

Le profit pour un agriculteur est :

$$\pi_i(\lambda_i) = \frac{\lambda_i S_N}{1 + \lambda_i I_a S_N} \left(1 - k - \frac{S_N}{(1 + \lambda_i I_a S_N) V}\right)$$

Supposons que tous les agriculteurs obtiennent la même part $\lambda_i = \frac{1}{n}$. La surface totale est :

$$S_{exa} = S_N \sum \frac{\frac{1}{n}}{1 + \frac{I_{ai} S_N}{n}} = S_N \sum \frac{T_{ai}}{n T_{ai} + S_N}$$

Si les agriculteurs sont identiques : on pose $T = \sum T_{ai} = n T_a$. Alors :

$$S_{exa} = S_N \frac{T}{T + S_N}$$

Le marché *ex ante* va permettre de redistribuer les λ_i en fonction des I_{ai} . On aura *in fine* $\sum \lambda_i^*(I_{ai}) = 1$ et de toute façon $S = \sum \frac{\lambda_i^* S_N}{1 + \lambda_i^* I_{ai} S_N} < S_N$.

Allocation *ex post*

Pour un ensemble d'agriculteurs averses au risque, on peut alors préciser l'équation de la partie précédente si on néglige l'existence d'une surface individuelle maximale s_m et si la tarification est globale et indépendante du volume attribué. La surface *ex post* est définie par :

$$S = T \frac{[\int_V r(\frac{V}{S}) - p \frac{V}{S}] - k}{\int_V (r(\frac{V}{S}) - k - p \frac{V}{S})^2}$$

Si on néglige le prix de l'eau, S vérifie alors, avec $T = \sum \frac{1}{I_a}$:

$$S \left[(1 - k)^2 - 2(1 - k)S \int_V \frac{1}{V} + \int_V \frac{S^2}{V^2} \right] = T \left[1 - S \int_V \frac{1}{V} - k \right]$$

$$\int_V \frac{1}{V^2} S^3 - 2(1 - k) \int_V \frac{1}{V} S^2 + [(1 - k)^2 + T \int_V \frac{1}{V}] S - T(1 - k) = 0$$

Pour T petit, S_{exp} tend aussi vers 0 donc :

$$[(1 - k)^2 + T \int_V \frac{1}{V}] S = T(1 - k)$$

$$S_{exp} = \frac{T(1 - k)}{[(1 - k)^2 + T \int_V \frac{1}{V}]} \simeq \frac{T}{1 - k}$$

Pour T grand, S_{exp} vérifie $T \int_V \frac{1}{V} S = T(1 - k)$ soit :

$$S_{exp} = \frac{1 - k}{\int_V \frac{1}{V}}$$

On retrouve bien qu'alors S tend vers un rendement moyen à l'hectare nul. D'autre part, $\frac{dS}{dT} = -\frac{\frac{\partial f}{\partial T}}{\frac{\partial f}{\partial S}} = \frac{1 - k - S \int_V \frac{1}{V}}{\frac{\partial f}{\partial S}}$. Pour des raisons de stabilité, l'équilibre de Nash correspond

à la racine la plus grande du polynôme du 3ème degré $f(S)$, d'où $\frac{\partial f}{\partial s} > 0$. De plus, $S_{\text{exp}}(T) < S_{\text{exp}}(T = \infty) = \frac{1-k}{\int \frac{1}{V}}$ donc : $1 - k - S \int_V \frac{1}{V} > 0$. Donc, pour tout T , $\frac{dS}{dT} > 0$: S_{exp} est une fonction croissante de T . Il y a une valeur T_N pivot : celle pour laquelle $S_{\text{exp}}(T_N) = S_N$. On trouve :

$$T_N = \frac{(1-k)^2 \int_V \frac{1}{V^2}}{4(\int \frac{1}{V})^3}$$

Marché *ex post*

Avec la fonction hyperbolique, la surface totale est définie par :

$$S = \frac{\int \left[(1 - k - \frac{2S}{V}) (T - \frac{S^2}{V}) \right]}{\int (1 - k - \frac{2S}{V})^2}$$

ce qui correspond à l'équation du 3^{ème} degré :

$$2 \int \frac{1}{V^2} S^3 - (1 - k) \int \frac{1}{V} S^2 + ((1 - k)^2 + 2T \int \frac{1}{V}) S = (1 - k) T$$

Donc, pour T grand $S \simeq \frac{1-k}{2 \int \frac{1}{V}} = S_N$ et pour T petit $S \simeq \frac{T}{1-k}$.

3.8.1 Données techniques des simulations effectuées sur les GIC

Pour modéliser une règle de répartition de type *ex ante*, le problème, identique au niveau individuel et collectif, est de répartir au mieux une ressource de débit donné entre différentes cultures. Les besoins de chaque culture sont la quantité d'eau nécessaire pour remplir le maximum entre les réservoirs racinaire et de surface dès lors que ce dernier est inférieur à 0.85 fois la Réserve Utile. Si la somme des besoins est supérieure à la capacité du forage, la répartition se fait proportionnellement aux besoins.

Les simulations sont effectuées avec la pluviométrie d'une année moyenne, d'une année quinquennale sèche et d'une année quinquennale humide. Pour construire l'année quinquennale sèche, on a choisi un hiver et un été, de quantile environ 0.35, de façon que la somme corresponde à une pluie d'année quinquennale sèche, avec une répartition de la pénurie identique entre l'été et l'hiver. La même méthode est utilisée pour les années moyennes (quantile 0.5) et humide (quantile 0.85).

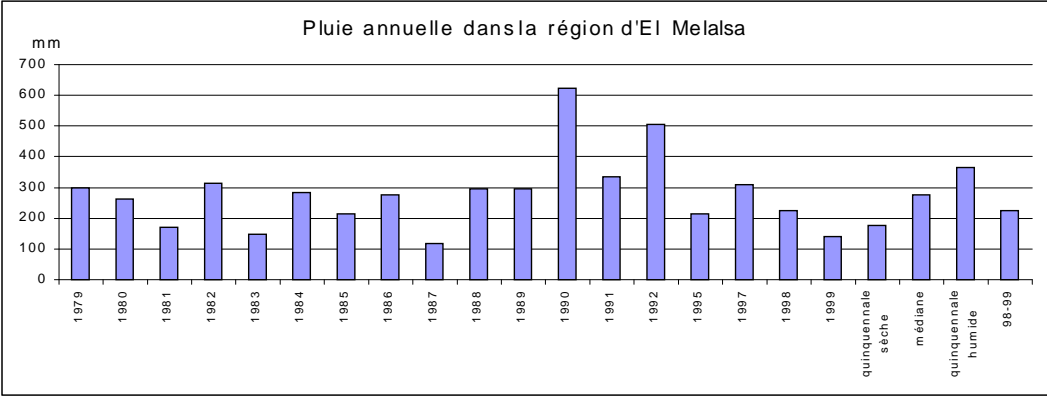


FIG. 3.14 – pluie annuelle dans la région d’El Melalsa

	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1995	1997	1998	1999	quinquennale sèche	moyenne	quinquennale humide	98-99	classement selon le niveau décroissant de pluie
jan	0	0	4	42	39	0	30	9	10	11	11	237	37	61	0	3	15	86	24	65	61	86	2
fév	43	11	32	9	3	8	12	5	13	23	23	0	39	103	0	1	2	2	43	15	92	2	16
mars	73	60	4	11	7	37	76	76	36	6	6	38	102	23	5	2	18	12	1	64	12	12	12
avril	34	48	10	28	3	25	16	0	2	27	27	89	32	29	2	2	39	4	6	27	19	4	13
mai	0	24	18	22	33	6	28	14	13	3	3	38	17	79	0	0	18	7	42	10	41	7	12
juin	0	2	9	2	10	0	0	6	0	27	27	0	18	18	18	0	1	4	9	13	18	4	8
juillet	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	20	0	0	0	0	0	4	36	6	78	4	2
août	6	10	0	0	0	13	0	5	0	17	17	60	0	0	34	2	31	6	2	28	16	6	8
sept	121	5	41	22	3	39	42	56	6	27	27	14	43	5	57	178	19	8	13	3	28	19	13
oct	14	50	43	76	36	107	10	15	17	53	53	47	15	18	38	91	69	1	0	27	0	69	2
nov	7	6	1	72	6	14	0	62	16	25	25	25	33	63	21	19	14	6	0	0	0	14	12
déc	0	45	6	29	7	36	0	27	5	78	78	53	0	107	38	11	0	0	0	19	0	0	17
Pluie annuelle	298	260	168	312	147	285	213	277	118	297	297	621	335	506	214	310	225	138	176	276	365	225	

FIG. 3.15 – pluie mensuelle dans la région d’El Melalsa

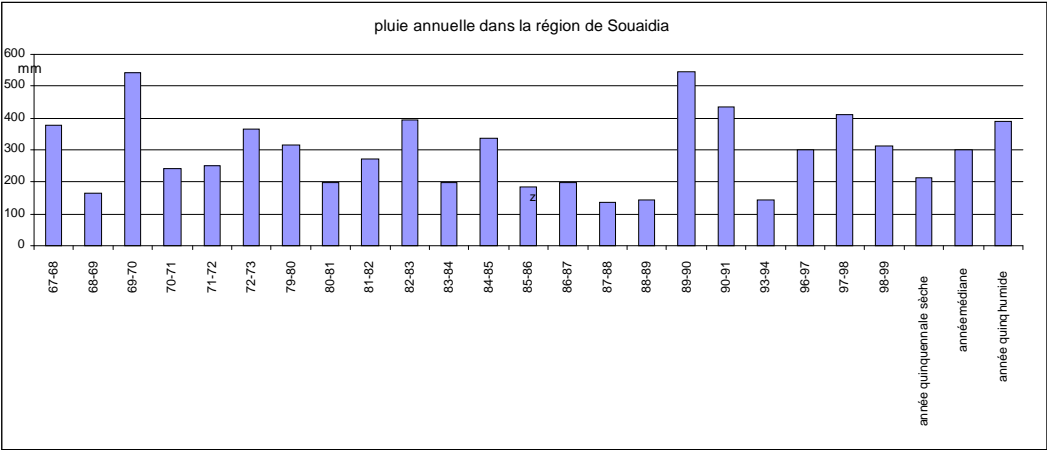


FIG. 3.16 – pluie annuelle dans la région de Souaidia

Chapitre 4

Lorsque le coût de vérification de l'allocation est important

*“Tout dépend de ce qu'on veut lui faire dire, au compteur.”
Un agriculteur dans le bassin de l'Adour*

Résumé du chapitre

Lorsque le coût d'acquisition de l'information nécessaire pour contrôler le respect des allocations est important, le Gestionnaire peut choisir d'utiliser des formes simples d'allocation. Il peut ainsi choisir de ne mesurer qu'une consommation en eau agrégée sur plusieurs irrigants. Il peut aussi définir une allocation en temps, plus simple à contrôler qu'une allocation en débit lorsque les prélèvements effectués par les agriculteurs sont faits de façon autonome.

Se pose alors un problème d'aléa moral en équipe. Dans le cas des rivières non réalimentées du bassin de l'Adour, l'utilisation d'une information agrégée crée la possibilité d'une irrigation stratégique : l'agriculteur irrigue plus lorsqu'il voit que la rivière approche d'un niveau de restriction. De plus, la définition d'une allocation en temps sans contrôle effectif des débits laisse la possibilité aux agriculteurs de se suréquiper par rapport à leurs voisins.

L'existence de ces deux types d'interactions est étudiée sur les deux rivières non réalimentées du Sud-Ouest de la France : l'Adour gersois et la partie du Gabas située dans les Pyrénées Atlantiques. Le suréquipement est mesuré mais il s'avère faible sur les zones étudiées. En revanche l'irrigation stratégique est reconnue comme source d'une inefficacité importante même si son existence est plus difficilement démontrée.

Un modèle multi-périodique reproduit le comportement d'irrigation stratégique. Il est résolu à rebours, en tenant compte d'un équilibre de Nash entre irrigants sur les choix d'irrigation, et ce à chaque pas de temps.

Enfin, différents scénarios de gestion de ces rivières non réalimentées sont proposés et caractérisés selon leur capacité à limiter ces interactions stratégiques, selon leur faisabilité technique et politique et enfin selon le coût d'acquisition d'information qu'ils nécessitent.

Dans les chapitres 2 et 3 précédents, le coût d'acquisition de l'information pour vérifier le respect des allocations est considéré comme nul. Cette hypothèse, réaliste pour un petit périmètre irrigué, ne l'est plus pour un grand système irrigué. En particulier, elle ne peut pas être maintenue lorsque les agriculteurs sont autonomes dans le choix de leur niveau de prélèvement, par exemple lorsque la ressource est un aquifère ou une rivière.

En raison de ce coût de l'information, le Gestionnaire peut choisir de simplifier l'acquisition d'information sur le système.

- A) Il peut choisir de mesurer les prélèvements en agréant sur un ensemble d'agriculteurs.
- B) Il peut choisir des types de mesure d'allocation nécessitant un faible coût de vérification, quitte à ce que ces allocations ne soient pas pertinentes.

Une allocation non pertinente consiste par exemple en une allocation en volume sur toute une campagne d'irrigation alors que la ressource est une rivière à débit non maîtrisé : l'allocation ne permet pas de garantir le respect d'un débit minimal pendant la saison d'étiage.

Du fait de ces deux simplifications, les agriculteurs disposent de marges de manœuvre qui créent des interactions stratégiques, elles-mêmes engendrant une gestion collective inefficace. Le Gestionnaire doit alors arbitrer entre la précision d'une allocation (plus ou moins individuelle, plus ou moins adaptée au type de contrainte associée à une ressource donnée) et le coût de vérification de cette allocation.

En France, la gestion quantitative de l'eau peut faire l'objet de la typologie très simple suivante.

- Pour un **aquifère**, une gestion à l'échelon de la campagne est en général suffisante. Un système de quotas annuels a ainsi été récemment instauré sur la nappe de la Beauce (Hanot, 1999). Le coût de vérification est faible puisqu'il suffit de mesurer la consommation une fois par an.

- Pour un **bassin versant avec une retenue en tête**

Le gestionnaire de retenue peut adapter les lâchers de barrage en fonction du débit total instantané prélevé : une gestion fondée sur des quotas en volume pour la campagne, est en général suffisante. C'est ainsi qu'est géré l'Arros, un des affluents de l'Adour (Faÿsse, 1998). De plus, la définition de quotas en débit utilisés par la CACG sur le système Neste permet de limiter le débit total prélevable et donc de limiter les risques que le barrage ne puisse lâcher suffisamment d'eau lors d'une pointe de la demande. Comme dans le cas précédent, en général un seul contrôle pendant la campagne suffit. De plus, la situation est celle d'une relation Producteur-Client : l'argent payé par l'agriculteur pour une production d'eau permet d'engager les moyens nécessaires au contrôle des prélèvements.

- Pour un **bassin versant sans retenue en tête**

Sur ces rivières, il n'y a pas de moyen de contrôle en amont du débit. En France, la Drôme (Zanker, 1999), certains affluents de l'Adour et l'Adour lui-même (Faÿsse, 1998) ainsi que de nombreuses rivières dans les Deux-Sèvres (Irrimieux, 1999) connaissent des problèmes quantitatifs d'eau et n'ont pas de retenues en amont du bassin. Le système

utilisé pour tenter de maîtriser néanmoins le débit d'étiage pendant l'été est le couple Autorisation de Prélèvement - décret Sécheresse.

L'autorisation de prélèvement est délivrée annuellement et correspond à un débit prélevable dans la rivière (assorti, plus récemment, d'un quota en volume sur la campagne pour certaines rivières). Lorsque le débit de la rivière atteint un niveau de restriction, des Décrets Sécheresse interdisent l'irrigation pour des périodes allant de 1 jour par semaine à l'interdiction complète, suivant le débit de la rivière.

Dans un tel système, l'allocation se fonde sur un mécanisme de vérification peu coûteux, ce qui donne naissance aux deux formes d'inefficacité A et B présentées ci-dessus.

D'une part, la mesure des prélèvements se fait de façon collective, par le biais de mesures du débit en quelques points de la rivière, ce qui crée la possibilité d'une **irrigation stratégique** : lorsque le débit de la rivière approche d'un niveau de restriction, les agriculteurs augmentent l'intensité de leur irrigation avant que ne soit annoncée la restriction de prélèvement. Or, les agriculteurs peuvent attendre un peu (ou en tout cas étaler dans le temps leur irrigation), ce qui permettrait à la rivière de ne pas atteindre de niveau de crise et donc de limiter les interdictions de prélèvement. L'inefficacité existe donc à deux niveaux :

- la rivière atteint plus souvent des niveaux de restriction qu'avec une bonne gestion collective ;
- l'administration met en place des interdictions de prélèvement qui peuvent diminuer les revenus des agriculteurs.

On peut considérer que le Principal (ici la Préfecture et la Mission Interservice de l'Eau) cherche à maximiser une fonction de bien-être collectif qui prend en compte à la fois le revenu des irrigants et le débit d'étiage. L'irrigation stratégique conduit donc à une baisse de l'utilité dans les deux membres de cette fonction de bien-être collectif.

Cette irrigation stratégique est aussi notée sur le bassin de la Boutonne (Coiron et al., 2001).

Une autre preuve de cette inefficacité : lorsque, sur de petites rivières, les agriculteurs se connaissent, ils décident parfois d'eux-mêmes de limiter leurs prélèvements pour éviter une baisse trop importante du débit. Un tel choix collectif s'est produit pendant l'été sur des rivières des Pyrénées Atlantiques : le Salès (Bourgeois, 2001) et le Gabas (Beucher, com. pers.).

D'autre part, si les agriculteurs reçoivent en théorie une allocation en débit par le biais de l'autorisation de prélèvement, en pratique le respect de cette allocation n'est pas contrôlé : les agriculteurs ne sont en fait contraints que par une seule allocation en temps, les interdictions préfectorales, ce qui leur donne la possibilité de se suréquiper.

Ce **suréquipement** est le résultat d'interactions stratégiques qui peuvent être décrites de la façon imagée suivante. Dans un tel système, après un été où les agriculteurs ont été contraints dans leur calendrier d'irrigation par les interdictions de prélèvement, chaque irrigant va acheter un équipement d'irrigation supplémentaire pendant l'hiver de façon à pouvoir irriguer en trois jours ce qu'il irriguait auparavant en 5. L'été suivant, l'augmentation générale du débit équipé

conduit à une chute plus rapide du débit dans la rivière et donc à des interdictions de prélèvement plus fréquentes, ce qui conduit l'hiver suivant l'agriculteur à investir dans de nouvelles capacités..., et ainsi de suite jusqu'à ce que le bénéfice marginal d'un nouvel équipement égale son coût d'investissement. Un tel suréquipement est bien sûr inefficace puisque la quantité d'eau présente dans la rivière n'a pas augmenté pour autant. Ce suréquipement est observé dans le bassin de la Boutonne (Irrimieux, 1999) et l'a été sur l'Arros, un affluent de l'Adour, avant la mise en eau du barrage de l'Arrêt-Darré.

Pourquoi un tel système de gestion réglementaire a-t-il été néanmoins mis en place ? La raison est avant tout que le coût de vérification de telles allocations est faible : il suffit de mesurer le débit en quelques points de la rivière et il est facile de vérifier, dans une vallée, l'utilisation éventuelle d'un canon d'irrigation pendant une période de prélèvement, alors qu'une mesure d'un débit utilisé est, elle, beaucoup plus difficile. De plus, la tension sur la ressource jusque dans les années 1980 n'était pas suffisante pour justifier un mécanisme plus lourd..., et jusqu'il y a peu un contrôle systématique des prélèvements individuels en rivière non maîtrisée n'aurait pas été accepté par les agriculteurs.

Le système a aussi mal fonctionné ces dernières années pour d'autres raisons.

- D'une part, comme décrit dans le chapitre préliminaire, **les interdictions ont souvent tardé à se mettre en place une fois le débit seuil atteint**. De plus, sur une rivière traversant plusieurs départements, il y avait une tendance, pour un département, à jouer au "passager clandestin" et à retarder la mise en place des interdictions de prélèvement.

- D'autre part, il existe un consensus autour du fait que les agriculteurs doivent recevoir un revenu minimal : le Préfet rencontre beaucoup de difficultés pour imposer une restriction de prélèvement si celle-ci met en danger le rendement des cultures. On observe ainsi parfois une corrélation entre la mise en place des interdictions de prélèvement et l'arrivée de la pluie : les irrigants font pression sur la Préfecture pour qu'elle retarde la mise en place de la restriction, jusqu'à ce que la pluie soit annoncée par Météo France. Une fois cette dernière prévue, les agriculteurs acceptent la mise en place de la restriction, ce qui permet à la Préfecture de montrer qu'elle a agi !

Sur l'Adour comme dans d'autres bassins, des plans de gestion de crise permettent maintenant de coordonner l'action des départements et de diminuer le temps de mise en place des restrictions de prélèvement : la Direction Départementale de l'Agriculture et de la Forêt (DDAF) n'a plus besoin de réunir la Commission Sécheresse et d'obtenir la signature du Préfet pour annoncer les premiers niveaux de restriction. Ces plans permettent aussi une application plus "systématique" des restrictions de prélèvement : ils permettent ainsi de limiter l'inefficacité telle que décrite dans les deux points précédents.

En revanche, reste toujours l'inefficacité due à la définition de règles d'allocation peu coûteuses en terme de vérification mais qui créent des interactions stratégiques.

La question des modes de contrôle des prélèvements d'irrigation sur les rivières non réalimentées est d'actualité en France, d'autant plus que depuis le printemps 2001, le Ministère de l'Agriculture peut conditionner les primes PAC à la mise en place de compteurs. Cet argument, beaucoup plus efficace que l'obligation définie dans la loi

sur l'eau de 1992 de "moyens de mesure adaptés", devrait conduire à l'achèvement de l'installation des compteurs sur tous les points de prélèvement individuel en France. Cependant, dans de très nombreux cas, la DDAF ne sait pas encore quel mécanisme de contrôle mettre en place à partir des relevés des compteurs.

Le but du travail de ce chapitre est de chercher à comprendre si, avec la même ressource à la fois insuffisante et incertaine, on peut améliorer la gestion collective de l'eau. Après avoir caractérisé la situation actuelle, on cherchera à tester différentes règles d'allocation possibles, en mettant en regard le gain attendu en termes de gestion de l'eau et une estimation qualitative du coût de vérification que la règle nécessite. Enfin, dans ce chapitre, l'assolement actuel est considéré comme une donnée fixe (la possibilité de modifier cet assolement sera envisagée au chapitre 6).

Puisqu'il n'y a pas de retenue en tête, que l'eau n'est en aucune manière "produite", tout système recourant à la tarification ne sera pas accepté par les agriculteurs. C'est pourquoi les scénarios étudiés se limiteront à différentes formes de quotas.

L'étude sera fondée sur l'exemple de l'Adour gersois et de la partie amont du Gabas, un des affluents de l'Adour.

Questions du chapitre

Quels impacts ont le suréquipement et l'irrigation stratégique sur la gestion de l'eau sur l'Adour et le Gabas ?

Peut-on alors attendre d'un changement de niveau d'acquisition de l'information et de règles de gestion une diminution de l'inefficacité causée par ces comportements stratégiques, i.e. une meilleure gestion collective de l'eau ?

Quel est le meilleur niveau d'information, lorsqu'on compare la diminution de l'inefficacité due aux interactions stratégiques qu'un niveau donné permet au coût d'acquisition que ce dernier nécessite ?

D'un point de vue théorique, le contexte est celui d'un aléa moral en équipe : le Gestionnaire observe l'effort agrégé de différents agents. Il doit choisir alors le niveau d'agrégation de cet effort, en mettant en regard l'inefficacité causée par l'aléa moral du à l'agrégation et le coût d'acquisition de l'information (fig 4.1).

La différence est importante, de ce point de vue, avec les chapitres précédents : ici, les interactions stratégiques sont toujours nuisibles, parce que l'effort stratégique ne correspond pas à un mécanisme de révélation indirecte, mais à simplement augmenter la part relative d'un agent sur le volume collectif totale.

Holmstrom (1982) montre que si on peut mettre en place des punitions collectives, i.e. ici ne pas distribuer toute l'eau qu'il serait possible d'accorder aux irrigants, alors on peut mettre en place un mécanisme d'incitations optimal. Ces punitions ont évidemment une possibilité d'application quasi nulle en pratique.

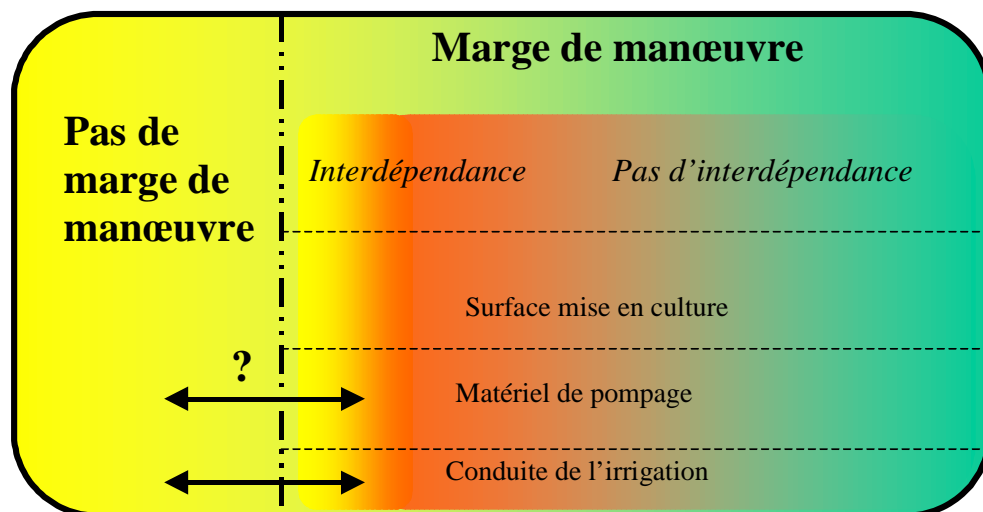


FIG. 4.1 – le choix d'un niveau d'agrégation d'information

Ce problème a été déjà soulevé en des termes proches à propos de problèmes de pollution. Lorsque le Principal fait face à un certain nombre d'entreprises potentiellement polluantes, il doit effectuer un arbitrage entre minimiser les coûts dus à la pollution et minimiser les coûts de mise en œuvre de la réglementation (Bontems et Rotillon, 1999).

Il existe cependant très peu d'études sur la question du coût optimal de vérification dans les problèmes d'aléa moral en équipe. De Janvry et al. (1998) se placent dans un cas où les agents ont à la fois le choix du niveau de fourniture et d'appropriation. Les agriculteurs peuvent choisir de se coordonner pour limiter le sur-investissement dans l'appropriation, mais la mise en place des règles de contrôle a un coût. Plus ce coût est important, plus la communauté va choisir un niveau d'appropriation proche de l'équilibre de Nash de façon à limiter les incitations à la fraude.

Dans les études économiques portant sur les mécanismes de gestion de l'eau, **le coût de mise en place des mécanismes de contrôle est rarement formalisé**. Montginoul (1999) utilise des modèles de théorie de l'Agence pour comparer différentes règles de gestion de l'eau dans le bassin de la Charente. Elle prend en compte dans ses comparaisons le coût de mise en œuvre d'une règle (i.e., simplement le nombre de techniciens que cette règle nécessitera). Montginoul conclut à l'avantage d'un quota pour le mois d'août, avec un taux de contrôle de 10% et des sanctions, soit à l'hectare soit au volume en cas de dépassement.

Citons aussi, puisque l'étude se fait ici dans un contexte dynamique, l'article de Holmstrom et Milgrom (1987) qui analysent un problème d'aléa moral entre Principal et Agent sur plusieurs périodes. Ils montrent que des contrats linéaires sont alors optimaux. Leur approche est en fait assez différente de celle étudiée ici car l'aléa moral étudié dans leur article présuppose une incertitude exogène, tandis qu'ici, le manque d'information ne porte que sur la répartition des prélèvements entre les différents irrigants.

Ce chapitre est de fait très qualitatif. D'une part, si le suréquipement est mesuré correctement, en revanche l'irrigation stratégique est plus un constat partagé que réellement

mesurée. D'autre part, le modèle présenté est extrêmement simple. Néanmoins, malgré cette simplicité, il peut aider à comprendre quelle sera l'efficacité de telle ou telle règle de gestion.

Le travail d'enquêtes et le modèle ont été réalisés avec Sophie Chevallier (2001). Une description succincte des usages sur les deux cas d'étude est faite en annexe de la thèse. Pour une description plus détaillée de ces usages, on pourra se reporter à Beucher (2000a) pour le Gabas et à Chevallier (2001) pour l'Adour gersois.

4.1 Les règles de gestion de l'eau utilisées sur l'Adour et le Gabas

Sur les deux bassins, la gestion réglementaire est fondée sur le couple Autorisation de prélèvement - Décret Sécheresse. Pour éviter de devoir réunir la commission Sécheresse à chaque décision d'interdiction, un Plan de Crise permet l'application des trois premiers niveaux d'interdiction sans l'accord signé du Préfet.

En 2000, la grille d'interdiction de prélèvement sur l'Adour gersois est définie selon la figure (4.2) (Préfecture du Gers, 2000). Pour les réseaux collectifs prélevant sur la rivière (ASA), il n'y a pas d'arrêt de pompage mais une réduction du débit pompé exprimé en fractions $1/7^{\text{ème}}$ du débit pour assurer un débit de salubrité minimal dans les canaux (c.f. fig. 4.2).

Débit de l'Adour à Aire/Adour (m^3/s)	Niveau de restriction	Mesure de restriction
5,8 (DOE)	Pré-alerte	Note uniquement à titre informatif pour les irrigants
2	1 ^{ère} restriction	interdiction de prélever 24h consécutives en alternance rive droite, rive gauche ou diminution de $1/7^{\text{ème}}$ du débit
1,5	2 ^{ème} restriction	interdiction de prélever 72h consécutives en alternance rive droite, rive gauche ou diminution de $3/7^{\text{ème}}$ du débit
1,2	3 ^{ème} restriction	interdiction de prélever 120h consécutives en alternance rive droite, rive gauche ou diminution de $5/7^{\text{ème}}$ du débit
1 (DCR)	4 ^{ème} restriction	interdiction totale

DOE : débit objectif d'étiage, DCR : débit de crise

FIG. 4.2 – les différents niveaux de restriction sur l'Adour gersois

Ce protocole de gestion est intégré dans le Plan de Gestion des Etiages (PGE) et dans un arrêté interpréfectoral qui garantit a priori l'absence de "passager clandestin" dans les quatre départements concernés. En pratique, depuis 1998, le barrage de l'Arrêt-Darré sur l'Arros relâche de façon informelle plus d'eau que le débit obligatoire de façon à limiter les interdictions de prélèvement sur l'Adour gersois.

Débit du Gabas (m3/s)	Niveau de restriction	Mesure de restriction
0.4	Pré-alerte	Alerte uniquement à titre informatif pour les irrigants
0.3	1 ^{ère} restriction	18 pompes en simultané
0.2	2 ^{ème} restriction	12 pompes en simultané
0.1	3 ^{ème} restriction	Arrêt total des prélèvements

Source : Chambre d'Agriculture des Pyrénées Atlantiques

FIG. 4.3 – les différents niveaux de restriction sur la partie Pyrénées-Atlantiques du Gabas

Un système identique existe sur le Gabas. Il a été souvent appliqué dans les années 90, avec des problèmes d'inéquité importante : lorsque, à la fin d'une période d'interdiction, les irrigants reprenaient l'irrigation, la capacité des pompes face au débit de la rivière était telle que souvent seuls les irrigants en amont pouvaient irriguer correctement.

C'est pour cette raison que, depuis 1999 et dans le cadre d'un projet Irrimieux, la Chambre d'Agriculture des Pyrénées Atlantiques a initié un système de rationnement co-géré par les agriculteurs, sur la partie amont du bassin. Le bassin est divisé en 6 secteurs. Dans chaque secteur, un chef de secteur est chargé d'appliquer un tour d'eau entre les irrigants, avec un quota d'heures proportionnel à la surface déclarée irriguée. Suivant le niveau du débit de la rivière en aval, un certain nombre de pompes peuvent fonctionner simultanément sur chaque secteur (fig. 4.3).

Ce système permet de mieux répartir géographiquement la pénurie. **Il ne permet en revanche pas de lutter contre le suréquipement ni contre l'irrigation stratégique.**

Il s'agit néanmoins d'une nette amélioration par rapport au système précédent. L'été 2001 a été particulièrement sec pour toutes les rivières non réalimentées des Pyrénées Atlantiques. Pourtant, le système de restriction mis en place par la Chambre d'Agriculture a été accepté par les agriculteurs et a pu fonctionner correctement.

4.2 Evaluation du suréquipement et de l'irrigation stratégique

4.2.1 Le suréquipement stratégique

sur le Gabas

Une enquête effectuée par Beucher (2000a) de la Chambre d'Agriculture des Pyrénées Atlantiques a permis d'obtenir des données exhaustives sur les surfaces irriguées et le débit équipé des 38 irrigants sur la partie Pyrénées Atlantiques du Gabas.

Il y a un suréquipement général, puisque le débit fictif continu moyen est de 1.99 l/s/ha, soit une surface irriguée égale à 46% de celle irrigable alors que le débit considéré comme suffisant est 0.65 l/s/ha. De plus, les irrigants faisant des cultures sous contrat (maïs semence, culture légumière) disposent d'un débit fictif continu moyen de 2.02 et d'une surface irriguée moyenne égale à 35% de celle irrigable (fig. 4.4). En effet, ces agriculteurs s'engagent vis-à-vis des coopératives à pouvoir irriguer suffisamment les

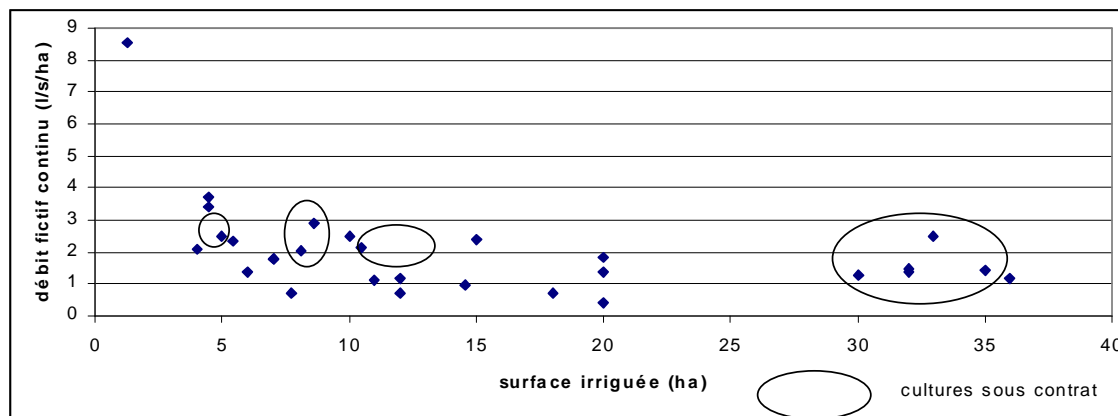


FIG. 4.4 – débit fictif continu en fonction de la surface irriguée sur le Gabas

cultures sous contrat. Si ces dernières souffrent d'un stress hydrique, les agriculteurs ont toutes les chances de ne pas voir leur contrat renouvelé l'année suivante.

sur l'Adour gersois

Les données n'ont pu être recueillies que pour 6 communes, soit 38 exploitants. Il s'agit de données pour quelques communes riveraines de l'Adour et elles n'ont pas de valeur statistique sur l'ensemble de l'Adour gersois.

Le débit fictif continu moyen est de 0.8 l/s/ha, contre un débit théoriquement suffisant de 0.6 l/s/ha : il y a donc un léger suréquipement. Ce suréquipement est plus important chez les petites exploitations (fig. 4.5).

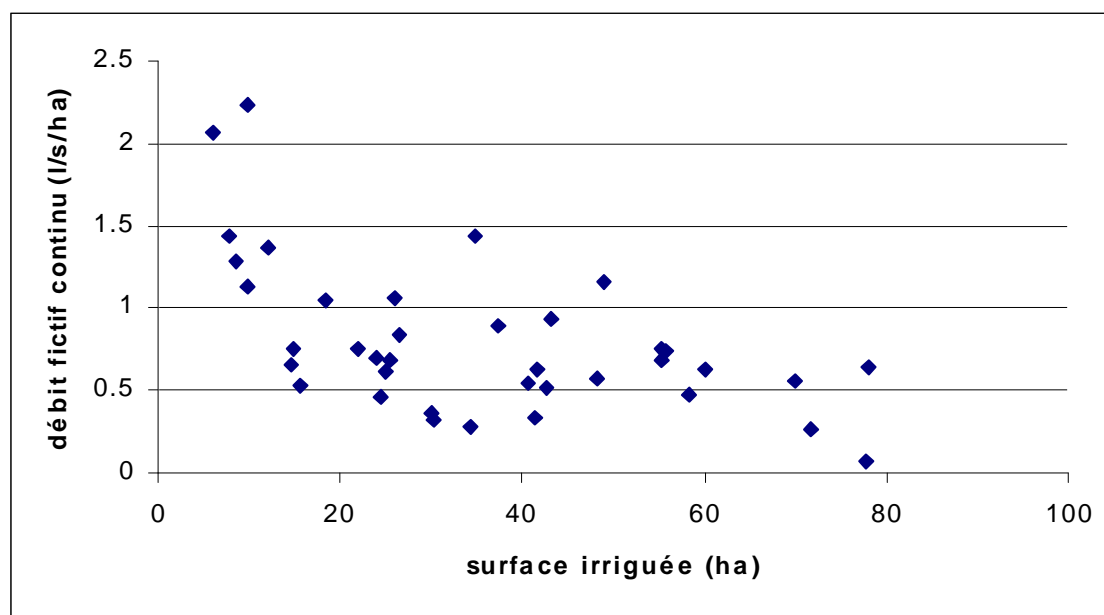


FIG. 4.5 – débit fictif continu en fonction de la surface irriguée sur l'Adour

On observe une grande différence de niveau de suréquipement entre ces deux zones.

En effet, le Gabas connaît de façon structurelle un manque d'eau pendant l'été : les interdictions de prélèvement y rythment chaque campagne d'irrigation. En revanche, l'Adour gersois n'a connu des crises que de façon ponctuelle ces dix dernières années.

4.2.2 L'irrigation stratégique

En 1999, sur l'Adour Gersois, le niveau d'alerte a été atteint le 20 août et les 25 et 26 août. La figure (4.6) montre l'évolution sur l'ensemble de la campagne des débits à l'amont (Estirac) et à l'aval (Aire sur Adour) de l'Adour Gersois, tandis que la figure 4.7 se focalise sur le mois d'août. De plus, pour ces deux figures, la courbe amont est décalée de 24 heures par rapport à la courbe aval de façon à représenter le temps de transfert de l'eau entre Estirac et Aire-sur-Adour. On peut voir sur la figure (4.7) que, suite aux alertes des 25 et 26 août, le débit s'est mis à baisser rapidement alors qu'en amont, le débit à Estirac restait à peu près constant. Cette chute est très probablement due à l'augmentation de l'irrigation.

Sur le Gabas, l'irrigation stratégique est rapportée par les agriculteurs (enquêtes réalisées et Beucher, 2000a) mais il n'y a pas de données explicites.

Si l'existence d'une irrigation stratégique nous est rapportée par les agriculteurs et les techniciens des DDAF, il nous est en revanche impossible de quantifier son impact collectif sur le débit du Gabas ou de l'Adour.

4.3 Un modèle pour l'irrigation stratégique

Le suréquipement existe mais il est peu important sur l'Adour. De plus, avec la baisse des cours du maïs, les agriculteurs n'investissent plus dans du matériel d'irrigation. Sophie Chevallier et moi avons donc préféré nous concentrer sur la modélisation de l'irrigation stratégique.

Le contexte est une rivière où la mesure du débit prélevé se fait en aval d'un groupe d'agriculteurs. L'objectif est ici de modéliser le fait que chaque agriculteur va chercher à irriguer au maximum de ses capacités lorsqu'il voit que la rivière va atteindre un débit correspondant à un seuil de restriction. Si la restriction était directement indexée sur son prélèvement individuel, l'agriculteur pourrait décider de retarder son irrigation de façon à ne pas subir d'interdiction de prélèvement. C'est cette inefficacité que le modèle doit caractériser. Le modèle doit ensuite permettre de tester différents scénarios possibles.

La modélisation a été effectuée en deux étapes.

1) Un arbre de jeu non coopératif sur quatre pas de temps est résolu à rebours : chaque agriculteur peut alors donner, à chaque pas de temps, une valeur à chacun des états de la Nature possibles. Le calcul de cette valeur tient compte d'un équilibre de Nash sur les stratégies d'irrigation.

2) Ensuite, une fois que chaque agriculteur peut attribuer une valeur à tous les états de la Nature, on part d'un état initial donné au pas de temps 1 et d'une chronique de débit sur les quatre pas de temps, puis on utilise les résultats de l'étape précédente pour calculer la trajectoire collective totale sur l'ensemble des trois pas de temps suivants.

Nous aurions pu nous inspirer des modèles où plusieurs firmes extraient de façon non coopérative des ressources d'un stock commun. Provencher et Burt (1993) modélisent

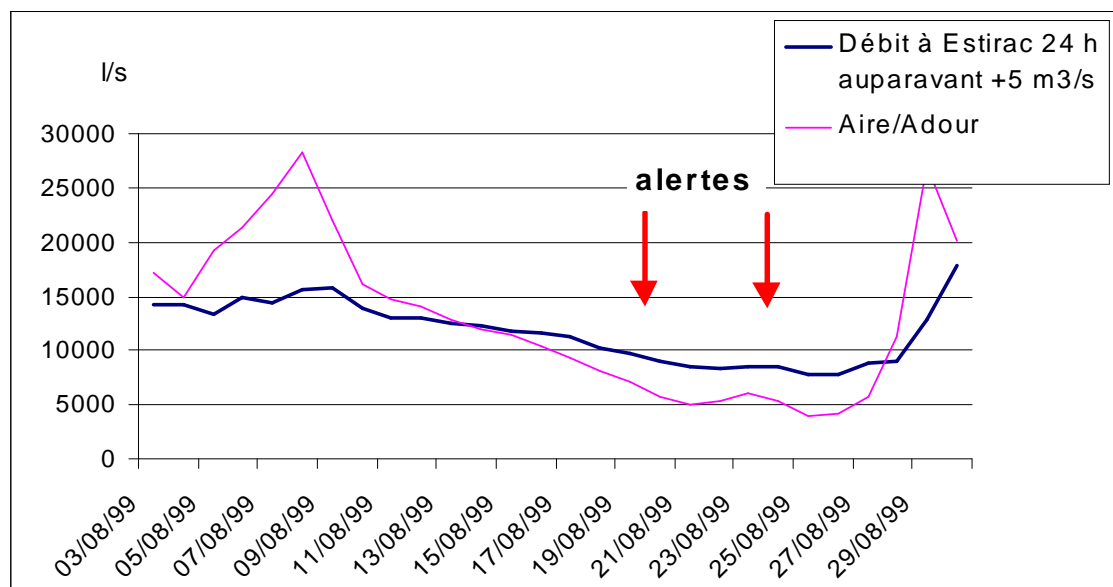


FIG. 4.6 – débits à l'entrée et à la sortie de l'Adour gersois à l'été 1999 (source DDAF 32)

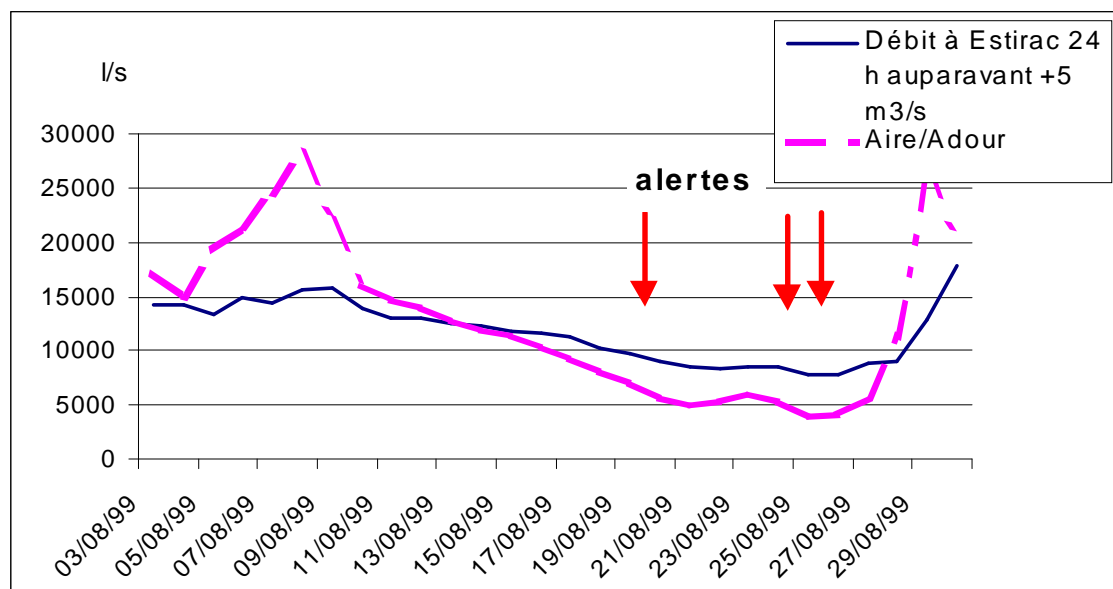


FIG. 4.7 – débits à l'entrée et à la sortie de l'Adour gersois en août 1999 (source DDAF 32)

ainsi, de façon dynamique, les équilibres de Nash pour le pompage dans un aquifère. Il nous a semblé cependant que ce type de modélisation est trop lourd par rapport aux objectifs de ce chapitre.

Ostrom (2001) pense que les acteurs ne choisissent pas en réalité leur stratégie par une optimisation à rebours. J'estime cependant qu'une telle approche est, dans notre cas, nécessaire pour faire apparaître des stratégies de sur-irrigation : il ne me semble pas possible de faire apparaître cette stratégie, i.e. une différence entre l'attitude d'un agriculteur en groupe et tout seul, par une simple résolution période après période.

4.3.1 Déroulement du jeu

Supposons que trois agriculteurs prélèvent de façon individuelle sur une même rivière. Ils sèment une surface donnée et identique de maïs, pendant une campagne d'irrigation divisée en quatre pas de temps. Il faut en effet au moins quatre pas de temps pour faire apparaître l'inefficacité liée à l'irrigation stratégique (voir infra).

A chaque pas de temps t , chaque agriculteur peut décider d'irriguer $V(t)$ ou non. Cette hypothèse de ne laisser le choix qu'entre ne pas irriguer et irriguer une quantité donnée est assez réaliste : les agriculteurs, lorsqu'ils décident d'installer un canon sur un champ, font peu varier la dose apportée (tout au moins pour un stade cultural donné).

En fonction du débit initial moyen de la rivière au pas de temps $t + 1$ et de l'ensemble des quantités d'eau prélevées par les trois agriculteurs $P(t) = V_1(t) + V_2(t) + V_3(t)$, le Gestionnaire applique une mesure de restriction qui sera **effective au pas de temps $(t+1)$** . Ce décalage existe en pratique : il se passe au moins 24 heures (et souvent plus sur l'Adour) entre le moment où la rivière atteint un niveau de restriction et le moment où l'interdiction de prélèvement est réellement appliquée aux irrigants.

La parcelle cultivée en maïs est simplement représentée par un réservoir à quatre niveaux (de 1 à 4) qui évapotranspire la valeur e à chaque pas de temps et qui peut être réapprovisionné par une irrigation $V(t)$:

$$R(t + 1) = R(t) - e + V(t) \quad (4.1)$$

Nous considérons qu'il existe quatre niveaux possibles h de restriction : de 1 à 4. **Un agriculteur ne peut, à un pas de temps t donné, irriguer plus que $h(t)$** . La figure (4.8) donne le lien entre prélèvement total et niveau d'interdiction qui sera utilisé par la suite dans la simulation.

A chaque pas de temps, un état du système Ω est caractérisé par le niveau des réservoirs sol des trois agriculteurs et par le niveau courant d'interdiction de prélèvement, soit un vecteur

$(R_1(t), R_2(t), R_3(t), h(t))$ (fig. 4.9).

Il y a ainsi $4^4 = 256$ états de la nature possibles par pas de temps.

4.3.2 Utilité de l'agriculteur

L'agriculteur cherche à maximiser son profit : il cherche à obtenir un rendement maximal en prenant en compte le coût éventuel de l'irrigation $c(t)$.

On peut relier la perte de rendement au stress hydrique subi par la plante.

Ce stress est mesuré par le niveau de réservoir dans le sol $R(t)$, dont l'évapotranspiration réelle* est une fonction croissante concave $ETR_t = X(R(t))$.

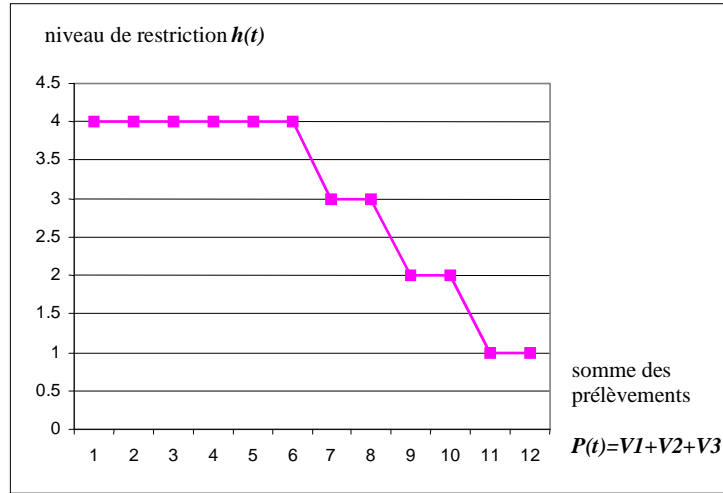
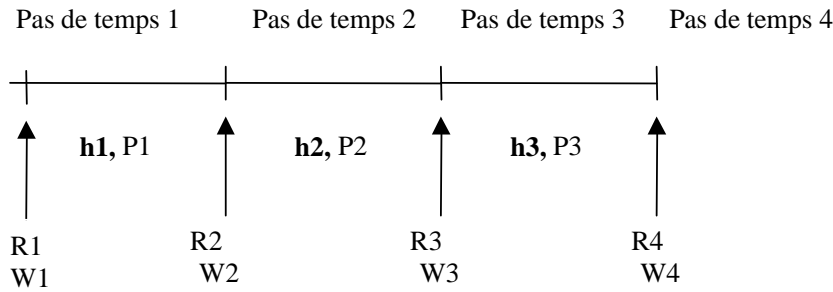


FIG. 4.8 – exemple de niveau de restriction de prélèvement en fonction du prélèvement collectif



$R(n)$: réserve utile du sol au pas de temps n

$W(n)$: valeur que l'agriculteur associe à un état de la Nature au pas de temps n

$P(n)$: la somme des prélèvements des trois types d'agriculteurs sur le pas de temps n

FIG. 4.9 – description générale du jeu

De plus, le rendement réel peut être calculé de façon approximative à partir du rapport entre l'évapotranspiration réelle pendant le cycle cultural ($\sum_t ETR$) et l'évapotranspiration maximale* ($\sum_t ETM$), i.e. l'évapotranspiration lorsqu'il n'y a pas de stress hydrique. Avec un coefficient k_y mesurant la sensibilité de la plante au stress hydrique, le rendement réel peut alors être lié à l'évapotranspiration réelle selon la formule approximative suivante :

$$\frac{\text{Rendement réel}}{\text{Rendement potentiel}} = 1 - \left[k_y \cdot \left(1 - \frac{\sum ETR}{\sum ETM} \right) \right] \quad (4.2)$$

Posons $X(R(t)) = \frac{ETR_t}{ETM_t}$. Alors :

$$R_{reel} = R_{pot} \left[1 - \left(k_y \cdot \left(1 - \sum_t \frac{ETM_t}{\sum ETM} X(R(t)) \right) \right) \right] \quad (4.3)$$

Enfin, on suppose que le profit est une fonction linéaire du rendement réel :

$$\pi = ar_{reel} + b.$$

On peut définir alors une fonction concave $W(R(t))$:

$$W(R_t) = \frac{k_y}{\sum_t ETM_t} ETM_t X(R(t)) \quad (4.4)$$

A partir de 4.3 et de 4.4, on peut alors définir le profit comme une somme de termes fonctions des niveaux de réservoir aux différents pas de temps et des irrigations éventuelles :

$$\pi_i = W(R1_i) - c_i(1) + W(R2_i) - c_i(2) + \dots + W(R4_i) \quad (4.5)$$

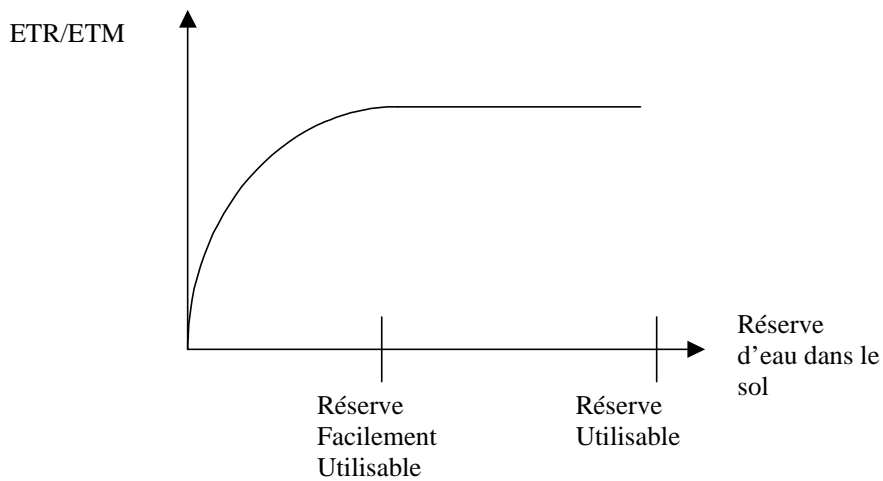


FIG. 4.10 – rapport ETR/ETM en fonction du réservoir d'eau dans le sol

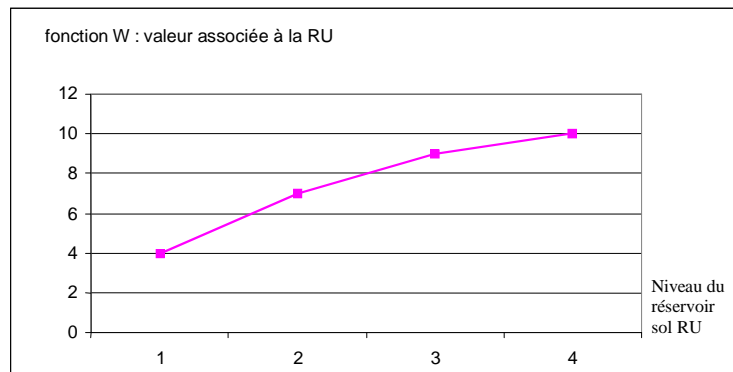


FIG. 4.11 – valeur W en fonction du niveau du réservoir sol

La figure (4.11) donne les valeurs de la fonction $W(R(t))$ qui ont été utilisées pour la simulation.

4.3.3 Résolution du jeu

Ce jeu est un jeu non coopératif répété qui peut être résolu par une **récurrence à rebours**. Pour pouvoir résoudre ainsi, il faut aussi supposer que l'agriculteur est neutre au risque : il résout alors l'ensemble du jeu en fonction de valeurs moyennes des débits dans la rivière par pas de temps.

Pour le pas de temps final, la valeur associée à un Etat de la Nature est simplement donnée par $W(R4_i)$. Ensuite, la valeur associée à chaque Etat de la Nature au pas de temps $t - 1$ est déterminée à partir des valeurs de tous les Etats de la Nature au pas de temps t .

Pour cela, on fait d'abord l'hypothèse qu'il n'y a pas de restriction au pas de temps t : $h(t) = 4$. On regarde alors, pour chacun des trois agriculteurs, sa décision d'irrigation. Pour l'Etat de la Nature $\Omega(R(t-1)_1, R(t-1)_2, R(t-1)_3, h=4)$, chaque agriculteur (par ex. l'agriculteur 1) calcule la valeur qu'il obtient s'il n'irrigue pas :

$$W_1(\Omega) = W(\Omega(R(t-1)_1 - e, R(t-1)_2 - e, R(t-1)_3 - e, h=4) \quad (4.6)$$

Il calcule aussi la valeur obtenue s'il irrigue :

$$W_1(\Omega) = W(\Omega(R(t)_1 - e + V(t-1)_1, R(t-1)_2, R(t-1)_3, h=4) - c(t)_1 \quad (4.7)$$

puis il choisit la solution lui permettant le meilleur gain (c.f. fig. 4.12).

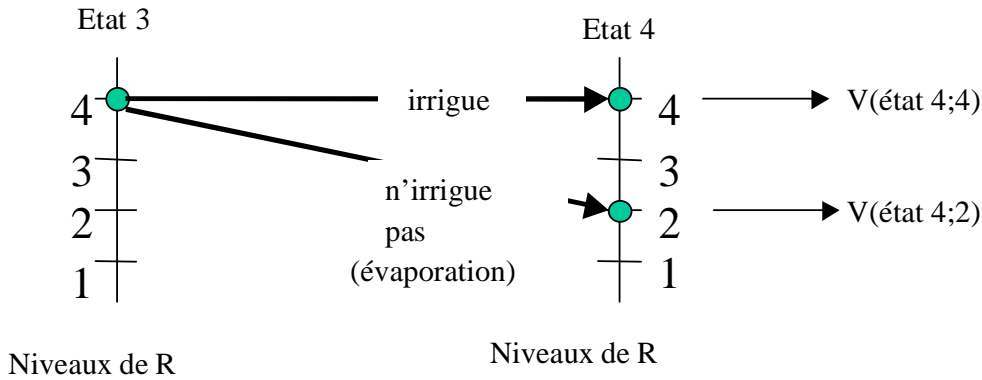


FIG. 4.12 – choix d'irrigation pour un agriculteur

Ce calcul est fait pour les trois agriculteurs, ce qui donne un prélèvement total $P(t-1) = V(t-1)_1 + V(t-1)_2 + V(t-1)_3$, et donc un niveau de restriction $h(t)$.

On recommence ensuite la simulation de chacun des irrigants jusqu'à l'obtention d'un équilibre, l'équilibre de Nash associé à cet état de la Nature.

Cette procédure est effectuée pour chacun des états de la Nature au pas de temps $t - 1$: on peut désormais associer à chacun des états de la Nature une valeur accordée par chaque agriculteur. Un exemple de calcul est donné en annexe.

Enfin, une fois une valeur attribuée à chaque état de la Nature par chacun des agriculteur, on peut raisonner "vers l'avant" (*forward induction*) et simuler des scénarios.

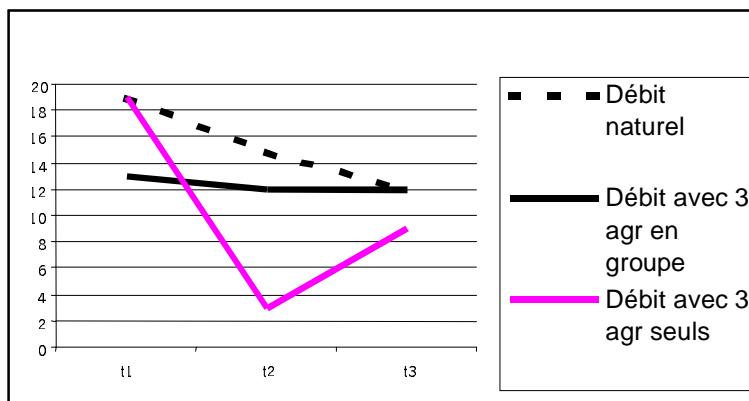


FIG. 4.13 – débits naturel et après prélèvement

4.4 Analyse de la situation actuelle

Pour les scénarios simulés - et même si cela n'a rien d'obligatoire - nous prendrons comme débit naturel initial dans la rivière pour chaque pas de temps, les valeurs moyennes, i.e. celles qui ont été utilisées lors de la résolution à rebours du jeu.

4.4.1 Modélisation initiale de l'irrigation stratégique

Les premières simulations ont montré que les agriculteurs seuls se comportaient comme ceux qui sont en groupe. En effet, les agriculteurs n'ont le choix qu'entre irriguer et ne pas irriguer. Si tous les pas de temps se valent, alors il vaut toujours mieux, pour un agriculteur seul, irriguer au maximum à un pas de temps donné t et ne prélever au pas de temps $t + 1$ que la dose correspondant niveau d'interdiction imposé, plutôt que de ne rien irriguer du tout au pas de temps t et irriguer au maximum au pas de temps $t + 1$.

Pour pouvoir faire apparaître une différence, une hypothèse très réaliste est de considérer que les agriculteurs ne mettent pas le même poids à chacun des pas de temps. Le maïs, en effet, doit absolument être correctement irrigué entre fin-juillet et début-août, pendant la période de floraison. Pour représenter cela, la valeur associée au réservoir R pour le pas de temps 3 a été doublée.

Deux situations sont donc comparées : une situation avec trois agriculteurs et une mesure collective des prélèvements, et une situation où les débits sont mesurés en aval de chaque agriculteur. Les agriculteurs ont des caractéristiques identiques.

Les figures (4.13) à (4.16) présentent les différents résultats de la simulation.

Connaissant l'importance d'avoir un réservoir sol élevé au début du pas de temps 3, l'irrigant seul choisit de ne pas irriguer au pas de temps 1 de façon à pouvoir irriguer au maximum au pas de temps 2 (fig. 4.14), et donc d'obtenir un réservoir sol complètement rempli au début du pas de temps 3 (fig. 4.15).

En revanche, l'équilibre de Nash sur le choix d'irrigation au pas de temps 1 conduit à une irrigation par tous les irrigants d'une valeur de 2 (fig. 4.14), ce qui conduit à une interdiction de prélèvement de 1, c'est-à-dire très stricte, au pas de temps 2 (fig. 4.16). Le réservoir sol au pas de temps 4 est alors peu rempli (fig. 4.14) ce qui conduit à une valorisation totale inférieure à celle réalisée par les agriculteurs seuls.

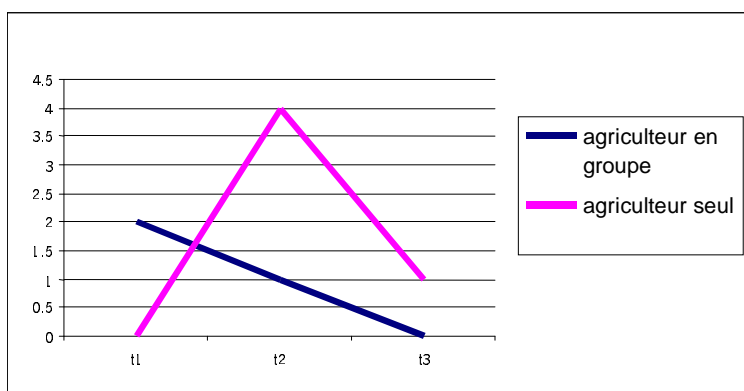


FIG. 4.14 – niveau d'irrigation

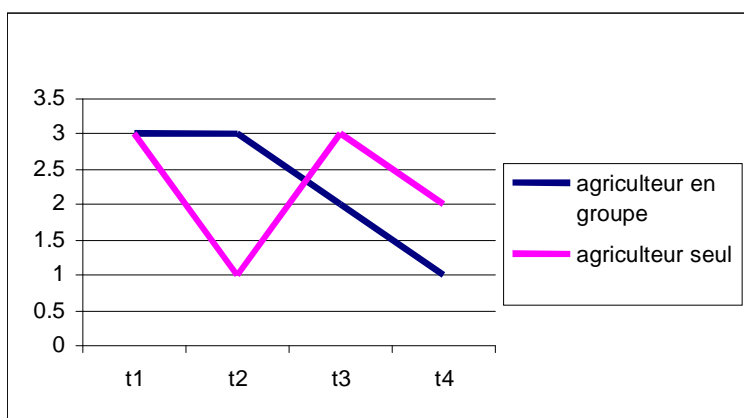


FIG. 4.15 – évolution du réservoir sol

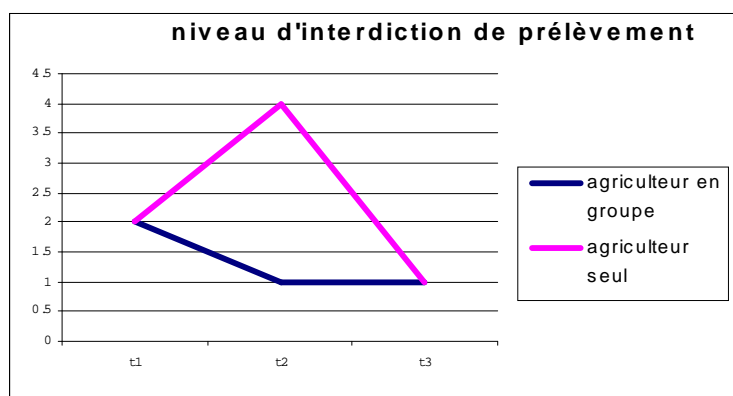


FIG. 4.16 – niveau d'interdiction de prélèvement

Il y a donc bien des interactions qui conduisent à une irrigation stratégique inefficace.

La figure (4.13) montre un autre point important : **une meilleure organisation de la gestion collective des agriculteurs peut conduire à un débit après prélèvement moindre pour la rivière.**

4.4.2 Impact de l’hétérogénéité

Nous examinons ici l’impact de l’hétérogénéité sur les types de sol : certains agriculteurs sur l’Adour possèdent des parcelles faites de sols sableux, qui nécessitent donc des apports à une fréquence plus élevée.

Nous avons simulé l’influence d’un sol filtrant : les sols des agriculteurs 1 et 2 évaporent avec un taux de 1 tandis que celui de l’agriculteur 3 évapore avec un taux de 2. La figure (4.17) présente, pour chaque pas de temps, les valeurs des réservoirs dans le sol, les niveaux d’interdiction et les décisions d’irrigation, lorsque les agriculteurs sont en groupe (partie de gauche) ou lorsque les restrictions de prélèvement qu’ils subissent ne dépendent que de leur propre prélèvement (partie de droite). La dernière ligne donne les profits finaux. Il apparaît que l’agriculteur 3 a bien intérêt à rester en groupe plutôt que d’être seul.

Lorsque les restrictions ne sont pas trop importantes, un agriculteur possédant un sol sableux a ainsi intérêt à se trouver en groupe.

Il est ainsi probable que les agriculteurs ayant de mauvais sols seront ceux qui s’opposent le plus à la mise en place de quotas individuels. De plus, la plupart des agriculteurs de l’Adour estime que le prix d’un terrain tient compte de la qualité du sol, et donc qu’il serait inéquitable de favoriser par des quotas spécifiques les agriculteurs possédant des sols filtrants.

		agriculteurs en groupe			agriculteurs seuls		
numéro agriculteur		1	2	3	1	2	3
état 1	RU	3	3	3	3	3	3
	interdiction	2			2	2	2
	irrigation	2	2	2	2	2	2
état 2	RU	4	4	3	4	4	3
	interdiction	2			2	2	2
	irrigation	1	1	2	1	1	2
état 3	RU	4	4	3	4	4	3
	interdiction	2			2	2	1
	irrigation	1	1	2	1	1	1
état 4	RU	4	4	3	4	4	2
valeurs finales		49	49	45	49	49	43

FIG. 4.17 – impact de l’hétérogénéité

4.5 Un mécanisme optimal pour des irrigants identiques et une information parfaite

Nous proposons ici un algorithme permettant d’attribuer des quotas hebdomadaires de façon optimale. Nous nous fondons sur le travail de Couture (2000) qui a étudié

le choix optimal des dates d'irrigation pour un agriculteur contraint par un quota en volume sur la campagne. Le problème est différent ici puisqu'il faut prendre en compte, à chaque pas de temps, le débit dans la rivière.

Supposons qu'il n'y ait qu'un seul agriculteur et que lui et le Gestionnaire soient neutres au risque. En adaptant le programme utilisé par Couture (2000), nous proposons le programme suivant pour le Gestionnaire :

$$\begin{aligned} \text{Max}_{\{V_t\}_{t=1,\dots,T-1}} & \left[- \sum_{t=1}^{T-1} cV_t + r.Y(M_T) - C_{FT} \right] + \left[\sum_{t=1}^{T-1} g(V_{env,t}) \right] \\ \text{s.c.} & \left\{ \begin{array}{l} M_{t+1} - M_t = f_t(M_t, R_t, \omega_{t,t+1}) \\ R_{t+1} - R_t = V_t + \epsilon_{t,t+1} - e(M_t, \omega_{t,t+1}) \\ V_{nat,t} = V_{env,t} + V_t \end{array} \right\} \end{aligned} \quad (4.8)$$

Le premier terme de la fonction à maximiser est le profit de l'agriculteur, le second correspond à la valeur donnée par le Gestionnaire à l'existence d'un débit dans la rivière. Les paramètres sont les suivants :

- V_t est la quantité irriguée à la date t , au coût unitaire c ;
- r est le prix de la culture, Y est la fonction transformant la matière sèche M en récolte, C_{FT} est le coût autre que l'irrigation ;
- ω correspond aux facteurs climatiques, ϵ est la pluie, e l'évapotranspiration ;
- f est la fonction de croissance de la plante ;
- $V_{nat,t}$ est le volume naturel à la date t et $V_{env,t}$ est le volume après prélèvement pour l'irrigation, avec une valeur associée $g(V_{env,t})$;

Couture (1999) propose une méthode de calcul par programmation dynamique. Cette méthode peut être appliquée ici : il est donc possible de calculer les prélèvements optimaux V_t^* à chaque pas de temps.

En fonction de l'état de la rivière à un pas de temps donné et des valeurs moyennes des débits naturels des pas de temps suivants, le Gestionnaire peut calculer cette valeur V_t^* et l'utiliser pour définir un quota hebdomadaire pour tous les agriculteurs sur le bassin considéré. Il n'y a alors plus d'irrigation stratégique, chaque irrigant utilise complètement son quota.

Si cette solution est séduisante sur le plan théorique, elle se heurte à plusieurs problèmes.

- Il existe une hétérogénéité importante entre les agriculteurs relativement à la qualité de leurs sols, au niveau d'eau dans ces sols et aux contraintes de calendriers d'irrigation ; le Gestionnaire n'a pas d'information sur cette hétérogénéité.

- Un tel mécanisme conduit à un calcul pas de temps par pas de temps du quota et de façon très peu lisible de l'extérieur. Il serait politiquement difficilement acceptable.

Il nous paraît donc beaucoup plus réaliste d'en rester à l'utilisation de quotas qui soient définis en fonction du niveau de la rivière, et ce avec la même règle de calcul durant toute la campagne.

4.6 Différents scénarios envisageables

Dans le bassin de l'Adour, un quota en débit existe déjà, en théorie, par le biais des autorisations de prélèvement. Il doit permettre de contrôler le suréquipement stratégique. Il permet aussi en principe de limiter l'étendue de l'irrigation stratégique. Cependant, les autorisations de prélèvement ne donnent lieu à aucun contrôle réel sur le terrain.

Sur l'Adour comme dans de nombreux bassins en France, des compteurs vont être posés : la Mission Interservice de l'Eau (MISE) s'interroge sur le type de quota volumétrique à ajouter au système actuel Autorisation de prélèvement-Interdiction sécheresse. De façon générale, il faut chercher à inciter les agriculteurs à avoir la gestion qu'aurait un agriculteur s'il était le seul irrigant sur la rivière, i.e. d'irriguer au maximum ses sols lorsque le débit de la rivière est important de façon à pouvoir moins irriguer lorsque le débit est à l'étiage.

4.6.1 Quota volume à la campagne

Sur l'Adour gersois, actuellement, les agriculteurs de l'ASA de Lapalud vont saturer la réserve du sol en juillet lorsqu'il y a suffisamment d'eau, pour ne pas à avoir à irriguer beaucoup à la fin du moins de juillet, pendant la période d'étiage important. Si on met en place un quota à la campagne, le maïs aura pour tous besoin d'eau aux mêmes périodes (la floraison a lieu fin juillet) et chaque agriculteur va alors économiser son quota pour l'utiliser lors de la période critique, ce qui ne va qu'aggraver l'étiage. **La seule gestion volumétrique à l'échelle de la campagne, pour une rivière à débit non maîtrisé, est insuffisante et pourrait même être contre-productive.** Cela dit, selon Irrimieux (1999), l'irrigation massive du maïs en période de préfloraison pour anticiper la période d'étiage provoque un risque accru de pollution azotée par lessivage. Une solution serait cependant de recourir à la fertigation*, qui permettrait à l'agriculteur de ne pas avoir à apporter tout l'azote nécessaire avant le stade 6-8 feuilles, stade à partir duquel l'agriculteur ne peut plus passer dans son champ avec son tracteur (Boubée, com. pers.).

Il aurait été possible de démontrer cette inefficacité du quota à la campagne de façon plus formelle en reprenant le modèle de programmation dynamique développé par Couture (2000) et en prenant en compte aussi des équilibres de Nash d'irrigation à chaque pas de temps. L'ensemble aurait été résolu de façon séquentielle, à rebours. Néanmoins, il me semble que l'investissement en modélisation aurait été très important pour un résultat de portée relativement faible.

Une possibilité est de limiter le quota à la période d'étiage. Montginoul (1999) propose ainsi d'utiliser un quota restreint au mois d'août, dans le bassin de la Charente, suite à la construction du barrage de Mas-Chaban. Cependant, les périodes d'étiage peuvent varier d'une année à l'autre et il existera toujours un comportement stratégique de consommation du quota au cours de la période définie.

4.6.2 Quota volume à la semaine

Ces quotas au pas de temps de la semaine sont souvent initialement définis en fonction des besoins théoriques des cultures. Ils sont ensuite éventuellement diminués dans une proportion qui dépend du débit dans la rivière. Comme tout quota en volume, ce type de quota permet de ne pas créer d'incitation au sur-équipement stratégique.

Depuis 1997, ce système a été progressivement mis en place sur quelques petits bassins versants dans le département des Deux-Sèvres (Baraton, 2001, Irrimieux, 1999), en Charente et dans la Vienne (Allain, 2000). Il est par exemple appliqué depuis 1998 sur

le Lambon, un affluent de la Sèvre Niortaise (Chambre d'agriculture des Deux-Sèvres, 1999).

Contrairement au quota à la campagne, ce mécanisme permet aux agriculteurs de continuer à avoir un comportement bon d'un point de vue collectif consistant à irriguer en juillet, quand le débit de la rivière est abondant, de façon à remplir au mieux la réserve du sol.

Cependant, **parce que les niveaux de restriction sont toujours fixés à partir d'une mesure collective des prélèvements, il persiste des interactions stratégiques conduisant à une sur-irrigation.** Dans les Deux-Sèvres, l'intérêt de cette irrigation stratégique est néanmoins grandement diminué par le fait que les irrigants peuvent ajouter la part non consommée du volume d'eau autorisé de la semaine n au quota de la semaine $n + 1$. Cependant, si l'irrigant ne consomme pas cette part en $n + 1$, il perd la possibilité de la consommer ; autrement dit, l'agriculteur ne peut ajouter à son quota en $n + 2$ qu'au maximum la différence entre le volume autorisé en $n + 1$ et le volume réellement consommé en $n + 1$. Sur les quelques années depuis sa mise en place, le système de quotas a permis de limiter les interdictions de prélèvement, même si l'on constate des dépassements de prélèvement (Baraton, 2001, Bellaud et al., 2000).

Ces quotas sont définis initialement en fonction des besoins théoriques des plantes. Si tous les agriculteurs semaient la même culture, ces indices n'auraient aucun intérêt puisque les quotas hebdomadaires en période de pénurie seraient définis suivant le niveau d'eau dans la rivière uniquement. En fait, ces indices servent surtout à donner différents niveaux de restriction pour différentes cultures. Dans les bassins de la Dive, du Clain, de la Charente et du Lambon dans les Deux-Sèvres, les quotas sont ainsi de 2 800 m³ pour le maïs (grain et ensilage), la fétuque et les légumes, de 300 pour le tournesol, de 10 000 pour le melon et de 4 800 pour le tabac blond (Baraton, 2001). Ces quotas sont ensuite tous diminués proportionnellement suivant le niveau de restriction annoncé par la DDAF.

Sur tous ces bassins, les quotas sont définis de façon hebdomadaire (sauf pour l'Aume Couture où ils sont définis de façon décadaire).

En termes d'acquisition de l'information, le système mis en place dans les Deux-Sèvres repose sur deux mécanismes :

- chaque agriculteur envoie une fois par semaine un relevé de son compteur à la Chambre d'Agriculture ;
- des contrôles sont censés être faits de façon aléatoire.

En pratique, il n'y a pas de contrôle effectué. La raison principale est que l'institution qui devrait être en charge de ces contrôles, la DDAF, n'a pas les moyens financiers d'effectuer les contrôles. De son côté, la Chambre d'Agriculture ne veut pas porter seule les coûts de contrôle. Cette absence de contrôle conduit certains agriculteurs à ne pas noter leur quota hebdomadaire et, ensuite, en fin de campagne, à répartir leur consommation sur le cahier de façon à respecter les quotas prescrits (Sixt, 2001).

Ce système n'a pas de statut légal qui lui permettrait de devenir obligatoire : quelques irrigants décident toujours de suivre le système initial d'interdictions préfectorales. Ce manque d'assise légale, joint au manque de contrôle, fait que même si des sanctions importantes sont envisagées, par exemple dans le cas de l'Aume Couture, elles ne sont en pratique jamais mises en œuvre (Sixt, 2001).

De plus, ce système nécessite beaucoup d'informations : sa mise en place sur de grandes zones pourrait être problématique.

Enfin, il est nécessaire que l'attribution initiale des quotas se fasse de façon transparente, ce qui, de l'avis de nombreux agriculteurs, n'a pas été le cas sur la Boutonne (Coiron et al., 2001). De plus, dans ce bassin, les quotas ont été avant tout distribués proportionnellement aux UTH (1000 sur 1300 équivalent-hectares), tandis que le reste a été distribué en fonction des équipements de pompage (300 équivalent-hectares). Le système a ainsi primé ceux qui s'étaient sur-équipés auparavant, ce qui risque d'inciter des agriculteurs sur des bassins voisins à se suréquiper à leur tour.

Un mécanisme d'épargne de quotas

Le système d'épargne d'une semaine à l'autre tel qu'il existe dans les Deux-Sèvres ne permet pas à la collectivité de garantir, pour une semaine donnée, la quantité d'eau prélevée. Nous proposons ici **un mécanisme qui permet d'adapter un mécanisme d'épargne à la situation d'une rivière au débit non maîtrisé.**

1. On se donne une échelle de limitation de prélèvement qui à chaque débit associe un volume total prélevable dans la rivière.
2. Pour une semaine donnée t , chaque agriculteur dispose d'un quota hebdomadaire $q_i(t)$ dont il consomme une quantité $v_i(t)$ pour irriguer une surface s_i (avec $S = \sum_j s_j$, la surface totale mise en culture et irriguée à partir de la rivière). Supposons que chaque agriculteur n'a pas consommé la quantité $r_i(t) = q_i(t) - v_i(t)$, ce qui correspond à une quantité totale $R(t) = \sum r_i(t)$. A la fin de la semaine, le débit $d(t+1)$ dans la rivière autorise le prélèvement d'un volume $V(d(t+1))$ par les agriculteurs.

Chaque agriculteur disposera alors d'un quota :

$$q_i(t+1) = \left[a \frac{s_i}{S} + (1-a) \frac{r_i(t)}{R(t)} \right] V(d(t+1)) \quad (4.9)$$

On retrouve bien que la somme des prélèvements $q_i(t+1)$ vaut le volume prélevable $V(d(t+1))$. Suivant la valeur du taux a , on privilégie plus ou moins l'épargne des quotas d'eau. Pour $a = 1$, on est dans la situation du quota hebdomadaire. Pour $a < 1$, on introduit une incitation à épargner le quota.

On peut même envisager $a = 0$, ce qui devrait permettre un lissage de la consommation puisque, si un agriculteur i pense au pas de temps t que les autres vont irriguer beaucoup, c'est donc qu'ils vont épuiser leur quota au pas de temps t . Par conséquent, ces derniers vont disposer d'une faible part proportionnelle de l'épargne et cet agriculteur i aura alors tout intérêt à peu irriguer au pas de temps t pour obtenir une grande part de l'épargne collective au pas de temps $t+1$.

4.6.3 Diminuer le nombre d'agriculteurs concernés par un point de mesure

Dans le bassin de la Boutonne (partie Deux-Sèvres), en 1992, un décret divise le bassin en 13 unités hydrographiques qui disposent chacune d'un point de mesure et de seuils de restriction.

Les groupes d'agriculteurs sont alors suffisamment petits pour que l'"autocontrôle" permette de limiter les interactions stratégiques menant au sur-investissement et à

l'irrigation stratégique. Il me semble que la taille du groupe permettant cet autocontrôle ne doit pas excéder 10 agriculteurs (sur le Gabas, le zonage effectué définit des groupes de 6 agriculteurs).

4.6.4 Coût d'acquisition de l'information

Il faudrait mettre en regard les bénéfices de ces scénarios et le coût en terme d'acquisition de l'information. Malheureusement, aucune étude dans ce sens n'a été effectuée à notre connaissance, hormis le travail de Montginoul (1999).

Il est possible maintenant d'équiper les compteurs d'émetteurs ayant une portée d'environ 1 km. Cet outil permettrait de réduire les coûts d'acquisition de l'information, même s'il sera toujours nécessaire qu'une personne aille vérifier de temps à autre que le compteur est correctement installé sur la pompe.

4.7 Conclusion

Nous présentons quelques conclusions, très qualitatives, issues de la modélisation et de l'analyse des différents scénarios possibles de règles d'allocation de l'eau.

- L'absence de coordination entre les irrigants fait que ceux-ci ne profitent pas au mieux du système de gestion actuel. En revanche, la gestion collective qui serait la meilleure pour eux n'est pas nécessairement la meilleure pour la rivière, comme que le montre la simulation effectuée. **Une meilleure gestion collective des prélèvements entre irrigants peut correspondre à un moindre débit dans la rivière.**

- Parmi l'ensemble des solutions envisagées, la limitation des puissances des pompes et la mise en place de quotas hebdomadaires permettent elles seules de limiter le suréquipement mais elles ne permettent pas de limiter l'irrigation stratégique.

- La mise en place de quotas en volume sur l'ensemble de la campagne est inefficace et pourrait même être contre-productive.

- L'irrigation stratégique existe en fait dès que les interdictions appliquées au niveau individuel sont fonction des volumes collectivement prélevés. Pour limiter l'irrigation stratégique, il est nécessaire que les restrictions d'irrigation subies par un agriculteur correspondent à ses consommations. On peut envisager deux systèmes.

1. - **Des limnimètres* en aval de groupes d'au maximum 10 agriculteurs**, avec des restrictions fonction de la différence entre l'amont et l'aval sur cette sous-partie de la rivière, de façon à inciter à la mise en place d'un auto-contrôle au sein du groupe. Ce système semble néanmoins extrêmement lourd à mettre en œuvre et à faire fonctionner.
2. - **Un mécanisme d'épargne de quotas** : la possibilité d'épargner l'eau non consommée pourrait compenser l'incitation à la sur-irrigation stratégique. La version actuelle utilisée dans le département des Deux-Sèvres, c'est-à-dire un simple report possible d'une semaine à l'autre, sera probablement une approximation suffisante dans de nombreux cas.

TAB. 4.1 – différentes règles possibles d'allocation de l'eau sur une rivière non maîtrisée

Règle envisagée	Amélioration individuelle	Lutte contre l'irrigation stratégique	Lutte contre le sur-équipement stratégique	Diminuer la demande de pointe	Coût de la mise en place	Faisabilité générale
Quota à la campagne	oui	favorise l'irrigation stratégique	non	non	faible	forte
Quota hebdomadaire	oui	non	oui	oui	fort	possible
quotas hebdomadaires avec épargne	oui	oui	oui	oui	fort	possible

◦ En ce qui concerne l'amélioration au niveau individuel, la mise en place de quotas hebdomadaires devrait permettre d'inciter les agriculteurs à mieux gérer leur eau : il existe un gain potentiel dans la diminution du simple gaspillage (doses apportées trop importantes, canons mal réglés qui arrosent hors des champs).

◦ **La mise en place de quotas hebdomadaires, éventuellement assortis de mécanismes d'épargne, semble être la meilleure solution dans la situation actuelle. Cette solution, séduisante en théorie, bute en pratique sur un manque de statut légal et de plus, le mécanisme ne peut être efficace que si les différentes institutions concernées (Etat, Agence de l'Eau, Chambre d'Agriculture) mobilisent le financement nécessaire pour effectuer des contrôles sur le terrain.**

On pourrait aussi envisager la mise en place de droits d'eau individuels et échangeables dans le cadre d'un marché. L'Association Générale des Producteurs de Maïs est favorable à un tel projet. On pourrait très bien imaginer des droits de prélèvement sur une rivière à débit variable, soit définis comme proportion du débit total (tels que les droits au Chili), soit avec des niveaux de restriction, comme les quotas hebdomadaires définis sur la Boutonne et le Lambon. D'ailleurs, les irrigants de la Boutonne envisagent de donner une valeur plus formelle à ces droits d'eau : la discussion est néanmoins encore ouverte de savoir si ces quotas seront attachés à la terre ou à la personne (Coiron et al., 2001). **Le principal frein à l'heure actuelle est probablement que l'administration est réticente à abandonner son pouvoir "souverain" d'attribution de droits d'eau.**

Enfin, comme présenté dans le chapitre précédent, on pourrait envisager la mise en place d'un mécanisme d'assurance extérieur au système irrigué. Une telle hypothèse est d'autant plus intéressante que, sur dans une très grande partie du bassin de l'Adour, toute la SAU est mise en culture et irriguée et donc il n'y a pas à craindre le surassement qu'engendrerait la mise en œuvre de cette assurance.

Le tableau 4.1 présente un bilan de ces différentes règles d'allocation de l'eau. Au chapitre 6 seront présentées d'autres possibilités pour limiter la pénurie en eau qui ne soient pas seulement des règles d'allocation de l'eau.

4.8 Annexes du chapitre 4

Exemple de résolution à un pas de temps par la récurrence à rebours

Supposons que les valeurs associées à chaque niveau de réservoir R soient celles de la figure (4.18). Supposons d'autre part que les valeurs associées à chaque état pour le pas de temps 3 soit celles de la figure (4.19).

R	valeurs associées
1	4
2	7
3	9
4	10

FIG. 4.18 – valeurs associées à chaque niveau du réservoir racinaire R

		h3			
		1	2	3	4
R3	1	8	10.6	12.4	13.2
	2	13.8	15.6	16.4	16.4
	3	17.8	18.6	18.6	18.6
	4	19.8	19.8	19.8	19.8

FIG. 4.19 – valeurs associées pour un agriculteur à un état de la Nature au pas de temps 4 défini par la R et le niveau courant de la restriction

Cherchons à calculer la valeur associée au pas de temps 3 si on considère que :

- l'agriculteur est seul ;
- il subit au pas de temps 2 une interdiction de prélèvement $h_2=2$ et de $h_3=3$ au pas de temps 3 ;
- l'évapotranspiration correspondante à la nature de ses sols est de 2 ;
- la réserve utile de son sol au pas de temps 2 est de 3 ;
- l'irrigation lui coûte 1.5 par unité d'irrigation.

Si l'agriculteur n'irrigue pas, son réservoir sol R vaudra $3-2=1$ au pas de temps 4, auquel il accordera une valeur de 12.4 puisque h_3 vaut 3 (d'après la figure 4.19). S'il irrigue, puisque son irrigation est limitée par $h_3=2$, son réservoir sol au pas de temps 4 sera de $3-2+2=3$, auquel il accordera une valeur de 18.6 puisque h_4 vaut 3. L'irrigation lui coûte $1.5 \times 2=3$: cette hypothèse lui apporte une valeur de $15.6 > 12.4$ donc il choisit d'irriguer.

De plus, le niveau de son réservoir au pas de temps 3 est de 3, donc de valeur 9. On peut déterminer la valeur qu'il associe à cet état du système : $9+15.6=24.6$. Cette méthode est ensuite appliquée pour tous les états du système de ce pas de temps.

Exemple de calcul d'un équilibre de Nash

On cherche à déterminer quel est le niveau d'équilibre d'interdiction de prélèvement h_3 pour l'état au pas de temps 2 : $R_{agr1} = R_{agr2} = 3$, $R_{agr3} = 4$ et $h_2=2$. Chaque agriculteur fait l'hypothèse d'abord qu'il n'y aura pas de restriction de prélèvement,

i.e. $h_3=4$. On utilise la même table pour le temps 3 que dans l'exemple précédent, c'est-à-dire la table de la figure (4.19). Pour un agriculteur 1 ou 2, on obtient les résultats suivants :

- s'il n'irrigue pas : $R_3=3-2=1$ de valeur avec $h_4=4$ de 13.2 ;
- s'il irrigue : $R_4=3-2+2=3$ de valeur 18.6.

Même si on prend en compte le coût d'irrigation de 1.5, chaque agriculteur va décider d'irriguer au maximum compte tenu de l'interdiction courante h . Par conséquent la somme des prélèvements au pas de temps 3 est de 6, ce qui correspond à un $h_3=3$.

Alors, on montre que les irrigants de type 1 et 2 continuent de vouloir irriguer une valeur de 2, tandis que pour le troisième obtient :

- s'il n'irrigue pas, R_4 vaut $4-1=3$ de valeur 18.6, compte tenu de $h_3=3$;
- s'il irrigue, R_4 vaut $4-1+1=4$ de valeur 19.8, auquel il faut enlever le coût de l'irrigation, i.e. $1.5*1=1.5$, soit une valeur associée au choix d'irriguer de $19.8-1.5=18.3$.

L'agriculteur de type 3 préfère donc ne pas irriguer. La somme des irrigations est alors de 4, ce qui correspond aussi à un h_3 de 3 : ces choix sont stables et le niveau de restriction associé à l'équilibre de Nash est $h_3=3$.

Chapitre 5

Synthèse des approches et ouvertures théoriques

“The assize comes to recognize if Nicholas Sonka has unjustly and without judgement diverted a certain water-course in Crowlas...to the damage of the free tenement of Gervase Blohicu in the same town within the assize. The jurors say that [Nicholas] has diverted it. Judgement : Let Gervase have seisin, and Nicholas is in mercy. Damages, two shillings.”

Jugement d'une Cour anglaise, 1200-1203 après J.C. (Scott et Coustalin, 1995)

Lorsque la contrainte du coût de production de l'eau devient importante et qu'il est difficile de limiter l'accès à la ressource, le Gestionnaire doit s'assurer d'une certaine congruence entre règles de contribution et règles d'allocation. De plus, si le Gestionnaire peut aussi choisir un niveau de production de la ressource en eau, il n'existe pas de mécanisme permettant de choisir, de façon optimale, la quantité d'eau produite et de la répartir : en fonction des critères d'équité admis, le Gestionnaire choisira entre différents types de tarification.

Il y a souvent renégociation de la règle d'allocation en cours de campagne, soit parce que les événements sont trop complexes pour avoir été précisés dans les règles initiales, soit parce qu'il apparaît la possibilité d'une allocation réalisant une amélioration paretienne de la situation de référence.

Pour que l'efficacité réelle d'une règle, i.e. lorsqu'on a pris en compte les marges de manœuvre des différents usagers, soit prise en compte lors du choix des règles, il faut une instance de négociation formalisée rassemblant tous les acteurs. Ces acteurs doivent pouvoir avoir accès à une expertise sur l'impact réel d'une règle envisagée. Suivant le rapport de forces entre les différents usagers, la présence de l'Etat sera alors plus ou moins nécessaire.

Ce chapitre propose de prolonger la question initiale de la thèse dans deux directions. D'une part, on ne considère plus la quantité de ressource disponible comme une donnée exogène. Le Gestionnaire peut choisir d'investir plus ou moins pour disposer d'un certain volume en eau.

D'autre part, nous mettons en perspective les résultats précédents au sein de la structure institutionnelle : comment les règles sont renégociées en cours de campagne...voire ignorées, et comment se fait la répartition des pouvoirs au sein de cette structure.

Une brève première partie présente d'abord un bilan des différentes approches mises en œuvre dans les chapitres précédents.

Questions du chapitre

Comment classer les règles de gestion de l'eau lorsqu'on prend aussi en compte la contrainte du coût de l'eau ?

Quelle est l'importance de la possibilité de renégociation en cours de campagne ?

Comment se négocient les règles d'allocation de l'eau, compte-tenu de leurs impacts différents au sein d'un groupe d'agriculteurs hétérogènes, tel que décrit dans les chapitres précédents ?

Quelle conséquence une telle approche peut-elle avoir sur le bon niveau de (dé)centralisation ?

5.1 Synthèse des différentes approches étudiées

La figure (5.1) propose un bilan des différentes règles d'allocation présentées dans les chapitres précédents¹. Les zones en grisé représentent les situations où des interactions stratégiques existent. Il n'est évidemment pas possible de mettre en place un marché lorsque les droits sont définis de façon collective.

En fonction des objectifs recherchés (valorisation de l'eau, partage du risque par le biais de la ressource) et des différents coûts possibles (de mise en place d'un marché, d'accès à l'information), il sera intéressant de chercher à se placer dans telle ou telle partie du tableau.

¹Les différents exemples indiqués dans le tableau ont déjà été présentés auparavant. Rappelons quelques sources bibliographiques : pour le système *warabandi* Murgai (1998), pour le barrage Big-Thompson Michelsen (1994), pour le Chili Bauer (1998), pour la Californie Jercich (1992), pour les oasis tunisiennes Bédoucha (1984) et pour Alicante Ostrom (1992).

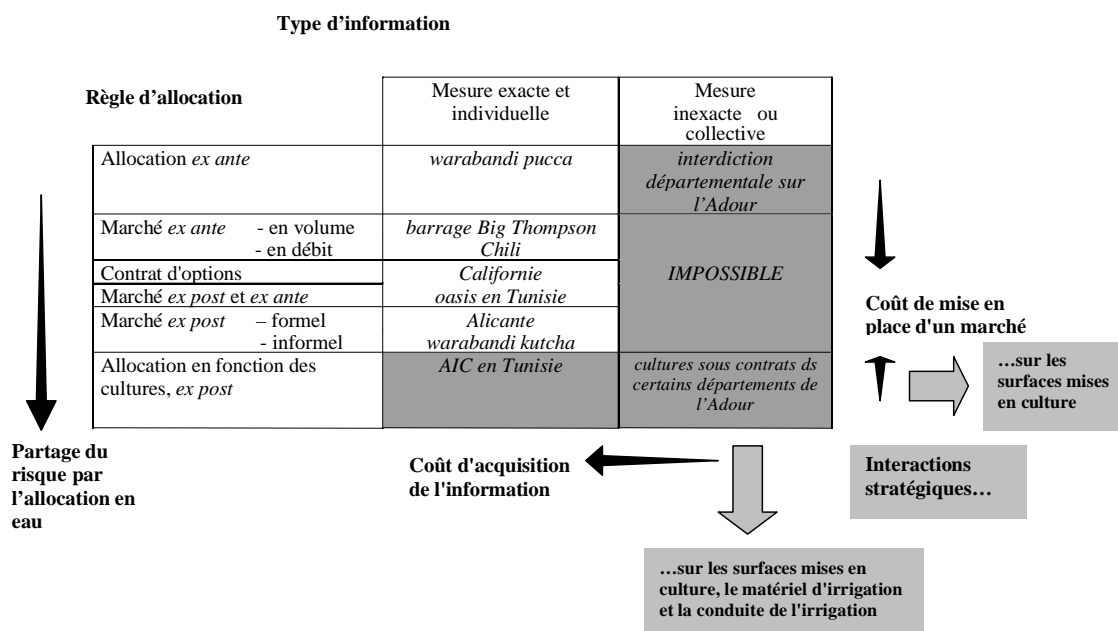


FIG. 5.1 – classification des différentes règles d'allocation possibles avec des cas d'application

5.2 Prise en compte de la contrainte de production de l'eau

Nous avons jusqu'ici limité notre travail au cas où la ressource n'était pas modifiable par les usagers et où la capacité à payer des agriculteurs dépassait le coût de production. Nous tentons de mettre en perspective les résultats précédents lorsqu'on ne suppose plus ces hypothèses.

La première ouverture est de considérer que le financement des coûts de production n'est plus garanti : il est possible que les usagers ne financent pas suffisamment.

Lorsqu'il est possible techniquement de refuser l'accès à la ressource à des usagers qui n'auraient pas payé, il suffit d'établir une tarification ou un mécanisme de vente annuelle aux enchères des droits d'eau pour assurer le financement des coûts de production. Montginoul (1997) propose un bilan des différentes formes de tarification envisageables. De toute façon, une fois que l'effort sur la "fabrication" de la ressource $C(V)$ est effectué, le Gestionnaire devra toujours partager un volume total limité entre des agriculteurs : **la tarification seule ne peut garantir de façon systématique le respect de la contrainte sur la ressource.**

Lorsque la limitation de l'accès est difficile, notamment au sein d'un périmètre irrigué, Ostrom (1990) et Dayton-Johnson (2000a, 2000b) estiment qu'une certaine congruence entre les règles de contribution à l'entretien de la ressource et les règles d'allocation de l'eau est nécessaire. C'est par exemple le cas dans des périmètres gérés par des associations d'usagers aux Philippines et en Indonésie, où les charges de maintenance sont proportionnelles aux droits d'eau (Yoder, 1994, cité par Rosegrant et Meinzen-Dick, 1996).

Dayton-Johnson (2000a) étudie des périmètres irrigués au Mexique où la répartition des coûts peut se faire de façon proportionnelle à la taille des exploitations ou bien de façon égalitaire, et de même pour l'allocation de l'eau. Il montre ainsi que, sur un périmètre irrigué, la maintenance est toujours supérieure ou égale dans le cas où les deux règles sont congruentes (proportionnelle/proportionnelle ou égalitaire/égalitaire) que dans le cas où elles ne le sont pas. En pratique, le cas le plus courant sur les 48 périmètres irrigués qu'il a étudiés est celui d'une répartition égalitaire des coûts et proportionnelle de l'eau. Dayton-Johnson explique une telle répartition par l'important coût de transaction que nécessite une répartition des coûts proportionnelle et aussi par le fait que c'est ce système que les agriculteurs les plus riches ont intérêt à imposer.

La deuxième ouverture consiste à ce que le Gestionnaire puisse choisir la quantité d'eau produite.

La contrainte principale pour le Gestionnaire est alors celle de l'équilibre budgétaire. Autrement dit, de même que, précédemment, la règle d'allocation devait respecter la contrainte que l'ensemble des volumes distribués doit être inférieur ou égal au volume disponible, il faut ici que l'ensemble des taxes perçues soit supérieur ou égal au coût de production de l'eau.

Bien sûr, cette augmentation de la production n'obéit pas qu'à des contraintes techniques ou économiques : elle doit se faire dans le cadre d'un respect du cadre légal désormais omniprésent dans le monde, portant sur la mobilisation ou le prélèvement de toute nouvelle ressource.

Il y a alors deux cas de figures principaux.

Le Gestionnaire décide de la quantité d'eau produite sur un horizon annuel voire pluriannuel

C'est le cas de la discussion sur la construction d'un barrage sur l'Adour, mais aussi de la durée que les agriculteurs acceptent de travailler pour entretenir les canaux d'un périmètre irrigué, par exemple au Népal (Steiner et Walter, 1992).

Il faut alors respecter la contrainte budgétaire sur un horizon annuel, puis la contrainte sur la ressource pendant la campagne.

Par rapport au programme initial (1.7), le Gestionnaire va pouvoir ainsi choisir un volume V à un prix $C(V)$. En Univers incertain, de même, le Gestionnaire choisira une fonction de densité $h(V)$ pour un coût $C(h(V))$.

En Univers certain, pour une règle d'allocation donnée, le volume optimal sera celui qui égalise la valorisation marginale de l'eau et le coût marginal de production $C'(V)$. Ce sont les méthodes coût-bénéfice utilisées lors du choix de la taille des retenues.

En Univers incertain, le Gestionnaire pourra à la fois choisir un volume moyen $E(V)$ et la variance de ce volume. Par exemple, lorsqu'une ASA investit dans la maintenance du réseau et des installations de pompage, elle agit avant tout sur la variance du volume distribué. Il y a donc là aussi à la fois un choix en terme de valorisation et en terme de prise de risque.

Le Gestionnaire peut décider en cours de campagne de la quantité d'eau produite

Ce cas de figure a lieu, par exemple, pour des périmètres irrigués pompant en rivière, pour lesquels le coût de l'énergie est le facteur limitant. Il n'y a alors plus aucune contrainte sur la ressource.

Une autre possibilité est que le Gestionnaire dispose d'une certaine marge de manœuvre sur la quantité d'eau totale consommée. C'est le cas en France, sur les rivières réalimentées par des retenues en tête de bassin. Le Gestionnaire a pour consigne de respecter un débit d'étiage avec un certain taux (souvent de 4 années sur 5). Dans ce cas, la tarification peut jouer un rôle incitatif pour maîtriser la consommation en eau. On peut, par exemple, classer différentes formes d'allocation, de rigides à incitatives, en fonction de la souplesse dont dispose le Gestionnaire (fig. 5.2).

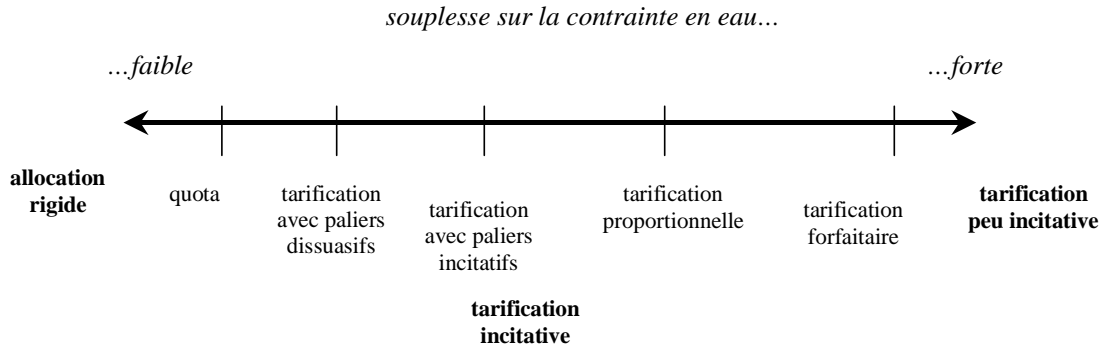


FIG. 5.2 – différentes règles d'allocation et de taxation en fonction de la rigidité de la contrainte en eau (d'après Montginoul, 1998)

Dans ce contexte, il y a toujours la possibilité d'interactions stratégiques entre agriculteurs.

Un exemple simple...

Si le coût comporte une partie fixe et une partie variable, la règle privilégiée par les économistes de tarification au coût marginal devient dans ce cas une tarification binôme où la partie fixe correspond au coût fixe de production de l'eau, et de même, la partie variable correspond exactement au coût variable de production. Si la tarification choisie n'est pas celle-là, il peut exister des interactions stratégiques entre agriculteurs qui vont modifier leur choix de consommation.

Ces interactions peuvent être illustrées sur un exemple très simple. Supposons qu'un système irrigué soit composé de n agriculteurs dont la fonction de profit est de la forme :

$$\pi_i = v_i - \frac{v_i^2}{2} - t(v_i)$$

où v_i est le volume consommé par l'agriculteur i et $t(v_i)$ est la taxe perçue par le Gestionnaire. Celui-ci produit un volume d'eau V avec une fonction de coût de la forme $C(V) = na_0 + b_0V$.

Si le Gestionnaire choisit de faire correspondre les parties fixes et variables des fonctions de coût et de tarification, il fera payer $t(v_i) = a_0 + b_0v_i$ à chaque agriculteur, de façon à s'assurer de l'équilibre budgétaire quels que soient les choix de consommation des agriculteurs.

Alors, l'agriculteur choisit une consommation selon :

$$\pi'(v_i) = 0 = 1 - b_0 - v_i$$

soit une consommation totale de $V_0 = n(1 - b_0)$.

Supposons maintenant que le Gestionnaire choisisse (ou se fasse imposer) un coefficient variable b différent de b_0 . Pour des questions d'équilibre budgétaire, le Gestionnaire devra alors ajuster le coefficient fixe selon les consommations des agriculteurs $C(V) = na_0 + b_0V = na(V) + bV$, c'est-à-dire :

$$a(V) = a_0 + \frac{b_0 - b}{n}V$$

La fonction de profit de l'agriculteur est alors :

$$\pi_i = (1 - b)v_i - \frac{v_i^2}{2} - a(V)$$

Soit, la condition de premier ordre :

$$0 = 1 - b - v_i - a'(V) = 1 - b - v_i - \frac{b_0 - b}{n}$$

d'où

$$v_i = 1 - b_0 + b_0 - b + \frac{b - b_0}{n} = \frac{V_0}{n} + (b_0 - b)\frac{n - 1}{n}$$

Le volume total consommé sera alors :

$$V = V_0 + (b_0 - b)(n - 1)$$

Si la partie variable augmente par rapport à la valeur de référence, il y aura une baisse de la consommation totale.

Le profit total dans la situation de référence est $\Pi_0 = n(\frac{1}{2}(1 - b_0)^2 - a_0)$, tandis qu'avec la modification de la partie variable, il diminuera toujours : $\Pi = \Pi_0 - \frac{1}{2}(b - b_0)^2(\frac{n-1}{n})^2$.

Du fait de la nécessité de l'équilibre budgétaire, il y a interdépendance entre les agriculteurs par le biais de la partie fixe $a(V)$. Cette interdépendance conduit de façon systématique à une baisse du profit total.

...et une approche plus générale

Dans le contexte de la production d'un bien par une entreprise publique, lorsque le Gestionnaire ne connaît pas l'utilité que les agents dérivent de ce bien public, il n'existe pas de mécanisme de taxation qui permette de réaliser une production et une allocation optimales sous contrainte d'équilibre budgétaire, même en utilisant des mécanismes de révélation (Laffont, 1988). Il faut donc chercher à comparer différentes règles dans une optique de second rang, par exemple selon la fonction de choix social ou les critères d'équité qui sous-tendent la définition de la règle.

Ainsi, d'un point de vue très général, Moulin (1990) compare différentes règles de partage des coûts et du bien collectif produit, lorsque les agents choisissent de façon autonome leur niveau de contribution à la production du bien collectif. Chaque règle est caractérisée à l'équilibre de Nash (à condition qu'il existe). Moulin montre, comme tout ce courant de littérature, qu'**aucune règle ne permet de satisfaire l'ensemble des critères d'équité envisageables**.

Nous reprenons ses notations mathématiques pour illustrer les différentes règles : chaque agent reçoit une quantité de bien q_i , pour laquelle il paie une somme x_i , et la règle

collective doit respecter l'équilibre budgétaire $\sum_i x_i = C(\sum_i q_i)$. On pose $Q = \sum_i q_i$. Moulin (1996) étudie en fait 4 règles d'allocation.

◦ **La tarification au coût marginal**

Chaque agent paie $x_i = q_i C'(Q) + \alpha$, le coefficient α étant défini de façon à respecter la contrainte budgétaire. Selon Moulin (1996), la tarification au coût marginal (avec une partie fixe pour l'équilibre budgétaire) possède plusieurs défauts :

- les usagers qui ne consomment pas paient tout de même la partie fixe ;
- une telle tarification peut dans certains cas ne pas atteindre l'optimum en cas de non convexité ;

◦ **La tarification au coût moyen**

Ici, chaque agent sélectionne sa demande, toutes les demandes sont fournies, puis chaque usager paie le coût moyen $x_i = \frac{q_i}{Q} C(Q)$. Le principal défaut de cette tarification est qu'elle n'est pas Pareto-efficace. Cependant, d'après Moulin : “ *any mechanism where individual agents choose their consumption of output and pay according to a mechanical formula typically has inefficient equilibrium allocations, and hence the tragedy of the commons cannot be taken as an argument against average pricing* ”². Autres défauts : l'équilibre de Nash peut ne pas exister, et le test d'absence d'envie (chaque agent est au moins aussi bien avec ce qu'il a qu'avec ce que reçoit tout autre voisin) peut ne pas être respecté.

◦ **La répartition des coûts à la Shapley-Shubik**

Chaque agent paie ici sa valeur de Shapley* du jeu coopératif associant à toute coalition le coût $V(S) = C(\sum_{i \in S} q_i)$. Par construction même, cette répartition permet de vérifier le critère d'équité suivant : aucun agent ni aucune coalition ne paie plus que si il ou elle était seul.

◦ **La répartition en série des coûts**

Cette dernière tarification est fondée sur le mécanisme suivant : l'agent 1 qui a la demande la plus faible, q_1 , paie le coût moyen comme s'il faisait partie d'un groupe de n agents identiques à lui, i.e. $x_1 = \frac{C(nq_1)}{n}$, puis l'agent 2 qui a la seconde demande la plus faible paie le coût incrémental moyen pour $n - 1$ individus et ainsi de suite jusqu'à l'individu n .

Moulin (1996) montre que si, comme toutes ces règles, la répartition en série ne vérifie pas tous les critères d'équité et n'a qu'une efficacité de second rang, elle assure au moins l'existence d'un équilibre de Nash dans un domaine très général, ce que ne garantit pas la tarification au coût moyen.

A notre connaissance, la seule application d'une règle de répartition des coûts à la Shapley-Shubik ou en série pour une RBC est une étude effectuée par Aadland et Kolpin (1998). Ces auteurs ont formalisé les règles de partage des coûts sur 25 canaux d'irrigation dans le Montana. Ces canaux prélèvent l'eau dans une rivière, puis traversent successivement plusieurs ranches. Deux types de partage des coûts existent.

- **Le partage au coût moyen.** Quel que soit le chantier, tous les agriculteurs d'un canal y participent de façon égale.

²Tout mécanisme pour lequel les agents choisissent leur consommation du bien produit et paient suivant une formule prédéfinie aboutit à des allocations à l'équilibre inefficaces, c'est pourquoi la Tragédie des Communs ne peut pas être utilisée comme argument contre la tarification au coût moyen.

- **Le partage en série.** Pour un chantier donné, ne contribuent que les agriculteurs qui en bénéficient, i.e. tous les agriculteurs en aval du lieu de chantier.

Chaque règle peut alors être définie par des axiomes d'équité différents dont le nécessaire respect est confirmé par les agriculteurs. Selon Aadland et Koplin, un argument important qui montre que ces arrangements sont perçus comme justes est que, à une exception près, ces règles n'ont pas été modifiées depuis la création des canaux, c'est-à-dire depuis au moins 50 ans.

Il serait très intéressant d'appliquer cette approche théorique aux règles d'allocation et de taxation de l'eau. Cependant, comme nous l'avons remarqué au chapitre 1, il faut pour cela prendre en compte le fait que les demandes des agriculteurs sont en fait des investissements (en surface irriguée), et donc que ces demandes influent sur les profits finaux.

5.3 De la souplesse dans le système : allocations informelles et renégociations

Quel est l'impact d'une incertitude dans l'application des règles ?

Dans un univers complexe, **l'information est toujours incomplète** : de nombreuses variables essentielles (états futurs du monde, prix, climat, caractéristiques techniques des exploitations) sont trop complexes pour qu'on puisse inclure toutes les modalités dans un contrat d'allocation en début de campagne à un coût accessible. De plus, les agents ne sont pas capables de prévoir (ou mettre la bonne loi de probabilité sur) tous les Etats de la Nature futurs du fait de leur rationalité limitée. Cette incomplétude va créer des espaces de renégociation plus ou moins importants pour deux raisons.

- **L'apparition de situations non prévues dans le contrat initial.**

Ainsi, les situations sur le système Neste sont à chaque fois trop complexes pour que ce qui a été défini *ex ante* soit repris tel quel : en cas de risque de pénurie sur tout ou partie du système Neste, les allocations initiales sont systématiquement renégociées en cours de campagne. Dans la *huerta* de Valence, le tribunal des Eaux, une institution vieille de plus de 8 siècles, permet de gérer tous les conflits d'interprétation des règles d'allocation de l'eau (Fernandez, 2001).

- **Une possible amélioration paretienne de la situation de référence.**

Une renégociation permet de chercher alors à remplacer la solution initiale, réglementaire, qui pourra toujours être utilisée en cas d'absence d'accord entre les parties (c'est le scénario par défaut des jeux de marchandage). Ainsi, dans certains GIC en Tunisie, les agriculteurs ont parfois fait appel à l'administration locale pour mettre en place "de l'extérieur" un tour d'eau parce que les négociations au sein du GIC pour redéfinir le tour d'eau n'aboutissaient pas. Le tour d'eau est alors conçu selon des critères techniques, de façon systématique. Enfin, dans les pays du Sud, sur les grands périmètres irrigués, l'allocation se fait souvent de façon formelle par l'administration et il existe par la suite une réallocation sur chaque canal tertiaire de façon informelle (voir par exemple un cas d'étude en Inde, Brewer et al., 1997).

Lorsque l'un des deux points précédents joue un rôle important, l'analyse économique du système doit se placer dans un cadre de **théorie des contrats incomplets**.

Par ailleurs, **l'existence de cette renégociation va aussi avoir une influence sur les prises de risques individuelles**. Par exemple, à El Melalsa, lors des périodes de tension importantes, le tour est renégocié à la fois en fonction de règles de priorité entre cultures et selon les poids politiques des irrigants. Les agriculteurs prennent en compte cette renégociation future lors de leur choix d'assolement. Ainsi, un des dirigeants d'El Melalsa a semé 2 hectares de melon en 1999, bien plus que ce qui est théoriquement permis, mais il savait qu'il pourrait influencer la distribution de l'eau pour assurer une irrigation suffisante de ses 2 hectares.

La fraude

Parfois le résultat d'interactions stratégiques

La fraude n'a pas été étudiée précédemment parce que le corps de règles considéré était avant tout celui réellement mis en œuvre, en négligeant les règles théoriques non mises en pratique.

La fraude peut elle-même être le résultat d'une interaction stratégique entre agriculteurs. Wade (1990) décrit comment les agriculteurs d'un périmètre irrigué en Inde, n'ayant pas confiance dans le système d'allocation de l'eau, prennent plus d'eau que ce qui est prévu lorsqu'ils ont la main d'eau, et par là perturbent le système, ce qui ne fait qu'accentuer encore plus les problèmes de fonctionnement du système..., et le manque de confiance des agriculteurs.

Weissing et Ostrom (1991 et 1993) caractérisent le niveau de fraude dans un périmètre irrigué comme un équilibre de Nash d'un jeu où l'agriculteur qui dispose de la main d'eau peut décider de prélever plus d'eau que l'allocation prévue tandis que les autres agriculteurs peuvent choisir d'effectuer un contrôle. Même dans ce contexte simple, il existe plusieurs équilibres de Nash possibles. De plus, pour un équilibre en stratégie mixte, l'impact d'une modification d'un paramètre du jeu n'est pas seulement déterminé par son effet direct sur la matrice des gains d'un joueur : pour déterminer les comportements à l'équilibre, il est nécessaire de prendre aussi en compte la modification induite sur le comportement des autres acteurs (effet "indirect"). Enfin, Rinaudo (2000) décrit précisément les différentes stratégies des agriculteurs pakistanais pour augmenter la quantité d'eau reçue.

Penser au niveau de respect des règles lors de leur choix

Un paramètre important lors du choix des règles est l'importance de la fraude qu'elle suscitera. Ainsi, Bennett et Howe (1998) estiment que la règle de répartition proportionnelle de l'eau entre Etats américains est meilleure que celle où l'Etat amont s'engage à laisser couler un débit fixe à l'aval car, dans le second cas, l'Etat en amont prend plus de risques, et, de ce fait, sera plus tenté par ne pas respecter la convention.

5.4 Pourquoi observe-t-on des règles de type *ex post* ?

L'analyse effectuée aux chapitres 2 et 3 a permis d'estimer l'efficacité des règles de type *ex post*. On peut ici proposer quelques raisons principales d'explication de la présence -assez fréquente- de ces règles (tableau 5.1).

- Les agriculteurs sont identiques et ils mettent plus ou moins en culture du fait de contraintes sur l'assolement.
- La règle profite avant tout à une minorité d'agriculteurs, par exemple ceux situés en amont du périmètre (c.f. le refus de certains agriculteurs de Bled Abida de mettre en place une limitation dans les surfaces mises en culture, voir annexe p. 246).
- Initialement, il n'y avait pas de contrainte sur la ressource et une règle *ex post* a été utilisée pour des questions de simplicité. Avec l'augmentation des surfaces mises en cultures, la règle devient inefficace, mais se pose alors un dilemme de second ordre quant à savoir qui va accepter de s'investir dans le changement de règles. Le cas du périmètre d'El Melalsa illustre bien ce dernier cas.

TAB. 5.1 – principales origines de l'existence de règles *ex post*

	Valorisation de l'eau et partage du risque	Équité
Rotation entre agriculteurs identiques	Oui	Oui
Profit pour certains agriculteurs	Possible	Non
Absence initiale de contrainte puis dilemme du second ordre	Non	Non

En fait, en pratique, l'existence sur un système irrigué donné d'une règle *ex post* provient souvent d'un mélange plus ou moins clair de ces trois causes : les règles de priorité sont justifiées pour des raisons de rotation sur la prise de risque, mais profitent souvent davantage, en moyenne, à certains agriculteurs.

5.5 Quel impact de l'existence systématique d'une marge de manœuvre sur la bonne structure de gestion ?

Les chapitres précédents ont montré dans quelle mesure, dans un groupe hétérogène, tel ou tel groupe d'agriculteurs gagnait avec l'application d'une règle donnée. Lorsqu'il y a négociation sur la règle de gestion de l'eau, chaque groupe utilise son estimation de l'impact d'une règle sur ses gains pour se positionner dans la négociation.

Ainsi, à El Melalsa, il n'y a pas eu de contrôle des surfaces parce que le Président, qui aurait eu l'autorité pour le mettre en œuvre, était le premier à profiter de cette absence de contrôle.

Les résultats précédents doivent donc nous permettre de mieux comprendre comment sont effectués les choix de règles, et éventuellement quelle structure de décision adopter.

Il ne s'agit pas ici de construire une quelconque théorie des institutions de gestion de l'eau, mais seulement de voir comment l'approche développée dans les chapitres précédents peut être utilisée pour aborder ces questions.

Cette partie s'appuie sur une typologie des différentes formes possibles d'institution de gestion de l'eau pour présenter quelques arguments, ou "conditions nécessaires" sur la structure de gestion de l'eau, à partir de l'approche adoptée.

5.5.1 Une nécessaire participation à la décision d'une instance de négociation regroupant tous les usagers

On peut dresser une typologie très simple des structures possibles de gestion de l'eau. Cette typologie est fondée sur l'importance de la négociation et sur le degré d'implication de l'Etat : elle est illustrée sur la figure (5.3). Cependant, plus que ce degré de présence de l'Etat, ce qui compte est l'évolution :

- d'une **gestion substantielle** "produite par des autorités centralisées définissant d'entrée les buts poursuivis et les moyens à atteindre", qui se fonde sur une "conception préalable de l'intérêt général" ;
- à une **gestion procédurale** : qui "opère par la mise en place territoriale d'instruments de connaissance, de délibération et de décision peu finalisés a priori". La gestion procédurale "construit par étapes un bien commun localisé, assurant la cohérence et la légitimité des décisions" (Lascoumes et Le Bourhis, 1998). La notion de gestion procédurale associe deux idées : celle d'un processus de décision négocié et celle de l'emboîtement des niveaux de décisions, les niveaux supérieurs fixant des limites au cadre d'action des niveaux inférieurs.

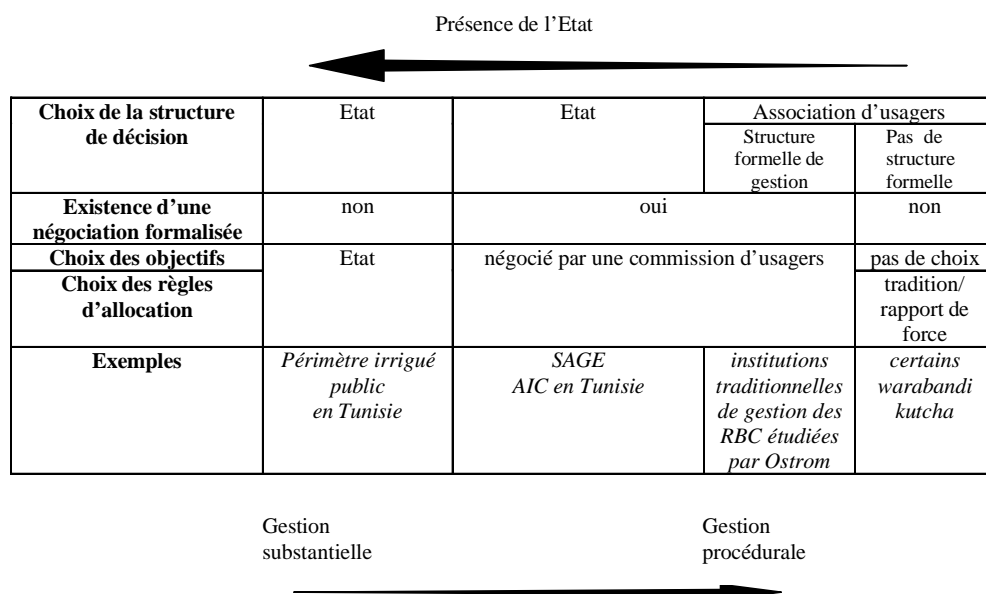


FIG. 5.3 – classification des différentes structures de décision possibles avec des cas d'application

Lorsque l'Etat décide tout

La gestion centralisée de l'eau fut un des éléments structurants des grandes civilisations hydrauliques telles qu'en Mésopotamie et dans les Andes (Wittfogel, 1956). Le principe d'un Etat à la fois planificateur et opérateur fut aussi au cœur de la conception de la gestion de la majeure partie des périmètres irrigués mis en place dans les Pays du Sud, dans les années 50 à 80 (colonne de gauche de la figure 5.3). Les objectifs sont définis souvent au niveau national : assurer l'autosuffisance alimentaire, maintenir une population dans les campagnes, essayer de faire bénéficier un maximum d'agriculteurs du périmètre irrigué, etc.

Le principal obstacle à une solution entièrement centralisée est en fait **l'asymétrie d'information**. D'un point de vue théorique, les hypothèses permettant une domination faible de la centralisation sur toutes autres formes d'organisation, par le biais du mécanisme de révélation, sont : l'absence de coût de communication, l'absence de collusion entre agents et la possibilité d'écrire des contrats complets (Caillaud et al., 1996).

Ces conditions ne sont évidemment pas vérifiées sur un système irrigué : il serait possible mais extrêmement coûteux de mettre en place les procédures d'acquisition de toute l'information nécessaire à l'établissement d'une allocation optimale. Par conséquent, il est plus réaliste d'utiliser **l'approche théorique émergente qui voit la collusion comme pouvant être socialement plus efficace qu'une décision centralisée lorsque la communication entre Principal et Agents est limitée** (Caillaud et al., 1996).

Enfin, en général, par manque de moyens financiers et d'incitations, l'Etat ne prend pas en compte tous les scénarios possibles de gestion de l'eau et n'estime pas, pour chacun d'entre eux, quelle sera la réaction de chaque groupe d'utilisateurs et par là quelle sera l'efficacité totale de la règle de gestion envisagée.

Des droits historiques ou issus d'un rapport de forces

Dans certains cas, l'allocation réelle résulte d'un rapport de forces et ne fait pas l'objet d'une négociation formalisée (colonne de droite de la figure 5.3). Sur certains périmètres irrigués indiens, les règles initiales de répartition de l'eau au niveau des secondaires et des tertiaires, de type *ex ante*, sont en fait modifiées suivant le rapport de forces entre les agriculteurs (Mollinga et Van Straaten, 1996). Au niveau d'un canal tertiaire (*watercourse*) étudié par ces deux auteurs, deux riches agriculteurs se situent à l'amont tandis qu'en aval se trouvent de nombreux petits propriétaires, qui, parce qu'ils ont besoin d'un accès au crédit et que leurs familles travaillent chez les grands agriculteurs, acceptent une répartition inéquitable de l'eau. Cette répartition est acceptée dans les choix de culture puisque les riches irrigants cultivent du riz et de la canne à sucre, cultures très consommatrices en eau, tandis que les petits agriculteurs choisissent des cultures ayant besoin de beaucoup moins d'eau, telles que le sorgho, le coton ou le mil. Néanmoins, lors de pénuries importantes, le tour d'eau théorique, *ex ante*, est appliqué. Enfin, il existe une lutte d'influence entre canaux secondaires : les agriculteurs font pression sur le Député local pour qu'à son tour il impose un arbitrage au Département d'Irrigation en faveur d'un secondaire particulier.

Une structure formelle de négociation

Les deux structures de gestion précédentes aboutissent souvent à **une allocation inéquitable de l'eau, en raison d'asymétrie d'information ou de la corruption dans le cas de la gestion centralisée, et en raison de rapports de force déséquilibrés dans le cas de certains systèmes traditionnels**. De plus, ces structures permettent aisément l'existence de **rentes informelles**, définies ici comme *un profit réalisé par un agent grâce à une allocation réelle plus importante que l'allocation officielle*³.

De nombreux auteurs ont montré en effet qu'une allocation informelle, différente du système officiel de répartition de l'eau, pouvait engendrer des rentes pour certains agriculteurs et par conséquent que ces groupes peuvent s'opposer à des réformes du système. Rinaudo (2000) quantifie ces rentes sur un canal secondaire au Pakistan. Ray et Williams (1999) montrent, sur un périmètre irrigué en Inde, que la prise en compte du vol d'eau permet d'expliquer la résistance des agriculteurs situés en amont à une baisse des subventions sur les prix des cultures. Sur les périmètres irrigués étudiés en Tunisie, l'absence de formalisation des règles d'allocation conduit souvent, en cours de campagne, à des arbitrages non équitables. De plus, cette mauvaise répartition de la pénurie a conduit à une baisse de la valeur totale produite sur le périmètre (à cause de la convexité des fonctions de rendement, voir chapitre 2).

Il est en fait nécessaire pour chercher à obtenir une allocation efficace et pour limiter l'existence de rentes, de mettre en place une gestion comportant une négociation formalisée. Cette négociation peut avoir deux origines : elle peut être issue d'une décentralisation ou bien d'une construction progressive de lieux de négociation par les irrigants (colonnes centrales de la figure 5.3).

Selon une approche descendante : la décentralisation

L'Etat fixe la structure de la commission de négociation, en laissant ensuite celle-ci définir les objectifs et les règles d'allocation.

Par exemple en France, les Schémas d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SAGE) doivent définir sur de petits bassins versants une planification de la gestion de l'eau et, entre autres, la répartition de l'eau entre les différents usages. Ces SAGE sont négociés au sein de Commissions Locales de l'Eau dont l'Etat a fixé la constitution de façon légale : 50% d'élus locaux, 25% de représentants des usagers et 25% de représentants de l'administration.

Plus généralement, le transfert de gestion pour l'irrigation (*Irrigation Management Transfer*) est devenu à partir des années 80 un des paradigmes de la gestion de l'eau (c.f. la première conférence sur ce sujet tenue à Wuhan en Chine, en 1994, rapport FAO-IWMI, 1995 et voir aussi une revue de littérature réalisée par Rinaudo, 2000).

Selon une approche ascendante

Dans de nombreux cas, les usagers ont créé leur propre instance de régulation de la Ressource en Bien Commun. L'ouvrage d'Ostrom (1990), *Governing the*

³Rinaudo (2000) utilise une définition différente de la rente, que l'on pourrait appeler **rente formelle** : "l'excédent de profit que procure l'usage d'un facteur de production par rapport à ce que ce facteur pourrait rapporter dans son meilleur usage alternatif sur un marché concurrentiel". Ces deux définitions sont en fait complémentaires : elles renvoient à deux situations qui peuvent coexister.

Commons : the evolution of Institutions for Collective Actions se consacre à l'analyse de ces systèmes de gestion traditionnels qui ont su émerger et perdurer. En général, il faut du temps pour que se mette en place un système de gestion négocié. Pour Steiner et Walker (1992), les systèmes qui partagent équitablement la pénurie entre l'amont et l'aval, i.e. une règle de type *ex ante*, sont des systèmes souvent anciens qui tous connaissent un sens de la communauté important. De même, selon eux, les systèmes jeunes utilisent tous des règles qui donnent priorité à l'amont sur l'aval. La seule exception notée est celle d'un périmètre irrigué au Népal, mais là, l'ensemble des agriculteurs est nécessaire à l'entretien du canal (c.f. la discussion sur la congruence entre règles de contribution au bien commun et règle d'allocation au début du chapitre).

Dans certains cas, L'Etat laisse les usagers construire leur système de gestion et définit un scénario par défaut, applicable en cas d'échec de la négociation ou d'une mauvaise mise en œuvre du mécanisme décidé.

Une approche avec des modèles de jeux de négociation ?

Lorsque les usagers ont la possibilité de définir eux-mêmes les règles de gestion, il se met en place un jeu de négociation entre les différents groupes en fonction de ce que chaque partie perd ou gagne pour une règle d'allocation donnée. Ainsi, Dayton-Johnson (2000a) montre que plus les associations d'irrigants sont hétérogènes, plus les riches irrigants réussissent à imposer une règle d'allocation proportionnelle à la surface possédée et non égalitaire. Il s'est produit la même chose à El Melalsa.

Dans le chapitre 2, il est apparu que l'allocation avec mutualisation ne permet jamais une meilleure valorisation que l'allocation *ex ante* et, de plus, la mutualisation est difficile à mettre en œuvre. Cependant, puisque cette règle d'allocation profite beaucoup aux agriculteurs de compétence moyenne, elle peut être obtenue à la suite d'une négociation entre irrigants.

On pourrait chercher à formaliser la négociation de règles d'allocation dans le contexte où chaque agent sait ce qu'il va obtenir d'une règle, que celle-ci crée une interdépendance ou non. Thoyer et al. (2001) proposent ainsi un modèle de marchandage qui utilise pour cadre d'étude le bassin de l'Adour, avec un contrat complet portant sur les quotas alloués aux agriculteurs, le volume des retenues et les débits pour l'environnement : aucun des acteurs ne dispose de marge de manœuvre après la négociation. Netanhyahu (1998) utilise elle aussi un modèle de marchandage pour déterminer la meilleure structure de négociation sur l'utilisation d'un aquifère partagé entre Israéliens et Palestiniens.

La théorie des jeux portant sur la négociation montre qu'il n'y a pas de concept universel permettant de donner la "solution" : celle-ci dépend toujours de la structure de la négociation (ordre éventuel des propositions ou des décisions entre agents, possibilité d'établir des coalitions, de rompre des engagements, etc.). Il est donc nécessaire, pour pouvoir essayer d'adapter un modèle de jeu à une négociation, de pouvoir formaliser la structure de jeu sous-jacente.

Il nous a paru que, pour les deux terrains étudiés, les négociations sur les règles de gestion de l'eau ne s'étaient pas effectuées de façon suffisamment formalisables en termes de jeux pour qu'un modèle puisse constituer une grille de lecture pertinente des négociations passées.

De plus, il ne nous a pas semblé intéressant de construire ici un modèle de négociation

qui n'ait pas de lien avec les terrains étudiés. C'est pour cette raison que ce chapitre suit une démarche qualitative, en n'utilisant les terrains étudiés que pour illustrer les arguments avancés.

Cependant, **l'utilisation d'une analyse en théorie des jeux non coopératifs, comme "entrée" d'un modèle de théorie des jeux coopératifs, pourrait se révéler d'intérêt sur un autre cas d'étude comportant une structure bien formalisée de négociation.**

5.5.2 Connaître l'impact des règles envisagées lors d'une négociation : les usagers doivent tous disposer d'une capacité d'expertise

Souvent, les différents acteurs présents lors de la négociation ne possèdent pas la même information sur les conséquences de telle ou telle règle de gestion envisagée.

Cette asymétrie d'information existe cette fois-ci entre certains usagers et l'Etat, en tant que participant à la négociation, mais aussi entre les différents groupes d'usagers. Elle a eu, et a toujours, de nombreuses conséquences sur la gestion de l'eau en France. Dans de nombreux cas, les agriculteurs ont su proposer et faire accepter un système de gestion dont ils savaient par ailleurs qu'il serait inapplicable, soit parce que le coût des moyens de contrôle nécessaires s'est avéré prohibitif, soit parce que le système conçu leur autorisait une marge de manœuvre suffisante pour détourner les règles.

Sur la Drôme, les Contrats Territoriaux d'Exploitation (CTE) ont donné la possibilité aux agriculteurs de choisir de mettre moins de surface en culture irriguée. Certains agriculteurs ont effectivement signé cette option des CTE ; cependant la moindre consommation en eau faite par ces agriculteurs a tout de suite été compensée par l'augmentation de consommation des agriculteurs n'ayant pas signé cette option du CTE !

Sur l'Adour, la CACG a longtemps suivi une politique qui consistait à peu diffuser l'information sur le régime hydraulique et l'estimation des besoins sur les différents affluents (Faÿsse, 1998). Lors des discussions sur la construction de barrage, les Associations de Protection de la Nature n'avaient pas les connaissances techniques nécessaires pour donner un avis critique sur les propositions faites, et ont donc dû s'en tenir à des positions de principe, ce qui a affaibli leur crédibilité lors de la négociation.

Ce déséquilibre crée le risque d'un rejet des procédures négociées par les acteurs qui ne parviennent pas à voir leur point de vue pris en compte. Ces acteurs utilisent alors des moyens légaux, en recherchant par exemple toute erreur dans la procédure d'instruction pour la création d'un barrage, ce qui ne permet en aucune manière de travailler à la recherche d'un compromis.

L'autre risque qu'un tel déséquilibre fait courir est un mouvement de **recentralisation** : le Ministère de l'Environnement estime qu'il a été berné par les agriculteurs lors de la négociation sur les modalités de gestion dans le bassin de la Charente, et accorde depuis beaucoup moins de confiance à d'autres procédures négociées en France.

Il est important de doter l'ensemble des acteurs de la gestion de l'eau, et en particulier les Associations de Protection de la Nature, d'une réelle capacité d'expertise.

Aux Etats-Unis, les associations de protection de la Nature ont un poids suffisant pour

participer à la négociation avec un rapport de forces équilibré (Mermet, 1998). C'est une des explications de la réussite des procédures de médiation dans ce pays.

5.5.3 La présence nécessaire de l'Etat dans de nombreux cas

Lorsque les rapports de force sont inégaux

L'Etat a un rôle à jouer pour une bonne représentation de l'ensemble des acteurs concernés.

D'une part, lorsque les rapports de force locaux sont déséquilibrés, l'Etat doit être présent pour que la décentralisation ne profite pas qu'aux puissants locaux. En effet, en l'absence de règles de démocratie locale explicites et appliquées, il est possible que la gestion de l'eau soit accaparée par un groupe de pression. Vermillon (1997) constate que, sur 8 études portant sur l'évolution de l'équité dans l'allocation de l'eau suite à une décentralisation de la gestion de l'eau, si 7 d'entre elles concluent à une meilleure équité (Philippines, Inde, Sri Lanka, Niger, Etats-Unis), une, faite aux Philippines, conclut à une baisse d'équité.

Cette inégalité des rapports de force entre usagers est un aspect important qui risque de limiter la capacité de pays du Sud à mettre en œuvre des mécanismes de gestion participatifs tels que les Comités de Bassin français.

En France, dans les Comités de Bassin, les usages Eau potable, Agriculture et Industrie ont des pouvoirs de taille comparable. Ce n'est pas le cas en Afrique du Sud par exemple, où lors de négociations sur une rivière, les agriculteurs noirs usagers des petits périmètres irrigués sont trop peu organisés pour pouvoir participer réellement à une négociation avec le secteur très développé des mines (Rouzeré, 2001).

De façon plus générale, la présence de l'Etat implique déjà une certaine forme de définition du bien-être collectif, ou tout au moins des critères d'équité, puisque l'idée même d'Etat s'appuie sur le fait que la Loi s'impose à tous les individus quels que soient leurs statuts sociaux. Par là, le concept d'Etat comporte la notion d'égalité entre citoyens (Siedentop, 2000).

Enfin, l'Etat doit représenter les acteurs concernés qui ne peuvent pas prendre part à la discussion, par exemple les générations futures. Cette représentation constitue un élément important lorsque, par exemple, le système irrigué tend à surexploiter un aquifère.

L'appel à l'Etat pour une redéfinition de l'allocation

Le rapport de forces avantageant les agriculteurs les plus influents peut être contesté, notamment par l'intervention de l'Etat. Au Pakistan, on distingue ainsi les *kachcha warabandi* (ou *kutchi warabandi*) décidés par arrangements entre les agriculteurs au sein d'un canal tertiaire (*watercourse*) et les *pucca*, où les tours d'eau ont été fixés par l'Office d'Irrigation, généralement après un conflit (Bandaragoda, 1998). "*Kachcha warabandi* became increasingly unpopular as it was prone to exploitation by large landowners. Whenever this pressure could be challenged openly, disputes were registered with canal authorities, and after prescribed adjudication processes, the *kachcha*

warabandi was converted to official *pucca warabandi* schedule" (Bandaroga, 1998)⁴. Cependant, même au sein des *pucca*, se décide un tour d'eau légèrement différent, généralement en début de campagne, par arrangement mutuel entre les agriculteurs.

Lors de tout projet de réforme, il faut tenir compte des rentes existantes dans la situation initiale, c'est-à-dire expliciter la situation réelle et non celle qui correspond à l'allocation théorique. Suivant le niveau de crise du système et la capacité de l'instance de décision à mettre en œuvre les choix qu'elle a effectués, il faudra tenir plus ou moins compte des rentes dans la conception de cette réforme.

Au Pakistan, ces rentes ont ainsi toutes les chances de mener à l'échec le projet actuel de réforme de la gestion des périmètres irrigués si elles ne sont pas prises en compte de façon explicite (Rinaudo, 2000). Par ailleurs, Brill et al. (1997) proposent une tarification où les droits sont distribués proportionnellement aux rentes historiques.

L'Etat comme source d'information et d'expertise

Dans de nombreux cas de problèmes d'environnement aux Etats-Unis, l'ensemble des usagers concernés se réunit pour négocier, et ce souvent de façon parallèle à l'instruction d'une procédure judiciaire. Les services de l'Etat n'interviennent alors dans la discussion que pour fournir des données sur le système : dynamique de la nappe, de l'écosystème, etc. Blomquist (1992) décrit comment les négociations sur les prélèvements en aquifère en Californie ont suivi ce schéma : ces négociations ont souvent abouti à un système de gestion efficace - mais pas de façon systématique.

Une organisation en niveaux imbriqués sur les grands systèmes

Comment allouer l'eau sur de grandes zones ?

Il n'est pas possible de réaliser l'allocation pour tous les usagers d'un seul tenant : il faut définir différents niveaux imbriqués. C'est d'ailleurs un des principes de gestion durable définis par Ostrom (1992). Pour construire ces différents niveaux, il faudra réaliser un compromis entre :

- internaliser des externalités, et donc chercher à augmenter la taille contrôlée ;
- disposer d'une information précise et pouvoir faire participer les usagers, et donc limiter la taille de ce système.

Gilbert et Picard (1996) proposent ainsi un modèle d'évaluation du niveau optimal de décentralisation, en fonction d'un tel dilemme.

Définir l'allocation de façon ascendante ou descendante ?

Reste une question, une fois que les différents niveaux ont été identifiés : faut-il allouer l'eau de bas en haut ou bien de haut en bas ?

Cette question fait partie des enjeux de la décentralisation. Ainsi, durant la discussion de la loi sur l'eau de 1992, les parlementaires français ont réfléchi sur la question de savoir s'il fallait faire les SAGE (niveau local) avant ou après les SDAGE (niveau plus global) (Barraqué, 1995). La première solution correspond à une approche plus

⁴Le système *kachcha warabandi* devint de plus en plus impopulaire parce qu'il était souvent utilisé pour les intérêts des grands agriculteurs. Quand cet accaparement put être remis en cause ouvertement, les contestations furent notées auprès des autorités du canal et après les procédés prescrits d'adjudication, le système *kachcha warabandi* fut converti en un système officiel *pucca warabandi*.

décentralisée, la deuxième a une approche plus planificatrice ; c'est la deuxième qui a été finalement retenue.

Choisir entre une approche ascendante ou descendante dépend aussi de la façon dont le problème est posé. Initialement, le Plan de Gestion des Etiages sur l'Adour devait être construit de façon ascendante. Il fallait d'abord, sous-bassin par sous-bassin, définir les ressources existantes, les besoins actuels et futurs, puis en déduire, au niveau de l'ensemble du bassin, les nouvelles ressources à créer. En fait, les quelques projets de barrage possibles étaient déjà identifiés, et c'est en fonction de leur future capacité que l'eau a été distribuée, selon une approche descendante (Faÿsse et Morardet, 1999).

Une nécessaire formalisation des prérogatives de chaque niveau

En 1998, la procédure de négociation du PGE de l'Adour amont a été stoppée par le Ministère de l'Environnement qui estimait que le compromis atteint entre la majeure partie des acteurs faisait encore la part trop belle au lobby agricole. Deux lectures de ce coup d'arrêt sont possibles.

- Le Ministère de l'Environnement intervient comme garant des intérêts du milieu naturel, parce que les rapports de force entre les différents usagers négociant étaient tels que l'avis des Associations de Protection de la Nature n'a pas réellement été pris en compte. La justification de l'intervention de l'Etat est alors celle présentée ci-dessus.
- Le Ministère de l'Environnement recentralise la décision et casse un mécanisme de décision efficace entre les usagers.

Il n'est pas de notre ressort de trancher entre ces deux interprétations. Reste que, d'une façon ou d'une autre, c'est la preuve d'un échec - ponctuel - de la décentralisation de la gestion de l'eau.

5.5.4 Définir dès le départ une instance de renégociation

Il est enfin très important de **définir des institutions responsables de la modification des règles de gestion** dès que nécessaire, et ceci pour deux raisons.

La capacité d'adaptation des agriculteurs

Quelle que soit l'importance de l'expertise *ex ante*, celle-ci ne permettra jamais de prendre en compte toutes les stratégies que les différents agents pourront déployer face à une règle donnée, en particulier du fait d'innovations technologiques toujours possibles. Il faut chercher à sécuriser les objectifs, à définir clairement l'instance qui est habilitée à modifier les règles de gestion de l'eau, et ensuite à rendre souple le choix de telle ou telle règle en fonction des réactions des usagers (Weber, com. pers.).

L'évolution globale de la demande

Nous avons insisté, dans l'introduction de cette thèse, sur l'augmentation générale de la demande en eau, pour tous les usages, au Nord comme au Sud. Les règles de gestion présentées dans les chapitres précédents ont été analysées pour un niveau potentiel de demande donné (par exemple la surface totale irrigable). Il faut donc pouvoir faire évoluer les règles d'allocation et de taxation de la façon la plus souple possible pour les adapter aux modifications de la demande globale.

Cependant, cette souplesse ne sera toujours que relative : **il est difficile de faire accepter à l'ensemble des usagers un mécanisme de gestion, en particulier**

une tarification, ce qui conduit dans les faits à une grande inertie. C'est pour cela qu'il est important de pouvoir prévoir, *ex ante*, le mieux possible, les réactions des différents usagers face à une règle donnée et l'impact de ces réactions sur l'efficacité de la règle envisagée.

5.5.5 Vers une société hydraulique ?

Nous appelons **société hydraulique** *une communauté d'usagers d'un système irrigué qui participent de façon active à la gestion du système, notamment à la définition des règles d'allocation et de taxation, et où le Gestionnaire est responsable devant ces usagers.*

Valeur légale des décisions prises localement

Pour qu'une telle société puisse prendre forme, la périphérie doit être protégée du Centre de façon légale. C'est l'un des principes de gestion durable énoncé par Ostrom (1992). C'est aussi un élément très important d'un bon rapport entre Centre et Périphérie, déjà mis en valeur par les philosophes du XVIII^{ème} siècle, et en particulier Montesquieu (Siedentop, 2000).

En ce qui concerne la **responsabilisation du Gestionnaire devant les usagers**, il faut en général trouver un équilibre entre :

- une gestion centralisée qui permet à la fois une efficacité collective lorsqu'il existe des externalités et une politique d'équité (transferts), et qui peut envisager le long terme ;
- une gestion décentralisée qui permet une meilleure responsabilité.

Seabright (1996) se pose ainsi la question du lien entre la décentralisation du pouvoir et la définition de politiques adaptées aux contextes locaux. Il postule que l'intérêt majeur de la décentralisation est d'inciter plus les gouvernants à mettre en œuvre des politiques qui répondent aux besoins des différents groupes d'électeurs. Il construit alors un modèle fondé sur le dilemme entre le gain de la centralisation en terme de coordination des politiques, et son coût en terme de perte de responsabilité du gouvernement face aux électeurs d'une région donnée.

En pratique, effectivement, lorsque l'Etat gère des systèmes irrigués, il met en place la plupart du temps des règles de type *ex ante*, à la fois pour des raisons d'équité et parce qu'il tend toujours à mettre en place des instruments uniformes, comme l'a remarqué Seabright. L'Etat n'a pas en général ni la volonté politique ni l'information suffisante pour mettre en œuvre des règles de type *ex post* qui seraient complétées par des mécanismes de redistribution financière.

5.6 Conclusion

Ce chapitre a été l'occasion de trois ouvertures.

La première ouverture concerne la ressource en eau : la Collectivité doit choisir un niveau de ressource disponible. L'existence d'interactions stratégiques sur la production du bien collectif pourrait alors s'inspirer des théories plus générales d'allocation.

Ensuite, pour instruire une réforme de l'allocation de l'eau, il faut prendre en compte le décalage entre allocation théorique, de référence, et allocation réelle : parce que

les agriculteurs renégocient l'allocation initiale ou bien parce que certains d'entre eux fraudent.

Enfin, nous avons cherché à comprendre comment l'existence systématique de marges de manœuvre à la disposition des usagers pouvait influencer sur la structure institutionnelle de choix de la règle d'allocation. Il est apparu la nécessité d'une structure de négociation formalisée entre usagers, participant à la définition à la fois des objectifs à atteindre et de la règle utilisée. Pour que cette structure puisse fonctionner correctement, il faut que :

- les différents usagers aient accès à une expertise de l'impact d'un scénario, soit en utilisant leurs propres experts, soit en se fondant sur l'analyse d'une tierce partie reconnue comme objective (qui peut être dans certains cas l'Etat) ;
- les rapports de force doivent être équilibrés, un déséquilibre pouvant justifier une plus grande intervention de l'Etat.

Pour concevoir une gestion de l'eau, la dernière étape consiste à définir les mécanismes de contrôle, de sanction et de modification des règles existantes. Ostrom (1992) propose un ensemble de principes de gestion des Ressources en Bien Commun et qui concernent, entre autres, ces mécanismes de contrôle et de gestion. Une analyse de la gestion de l'eau sur l'Adour selon ces principes a déjà été effectuée (Faÿsse, 1998) : on ne reviendra pas sur ces questions ici.

Chapitre 6

Retour sur les terrains d'étude : quelques propositions

“On ne peut pas laisser les agriculteurs gérer l'eau tout seuls, ça chaufferait trop vite. Il faut l'intervention de l'administration.”

Un agriculteur sur l'Adour gersois

Résumé du chapitre

Dans les périmètres irrigués tunisiens, l'efficacité de la gestion collective de l'eau peut être un paramètre non négligeable par rapport à la qualité technique de la distribution dans le réseau.

Une bonne gestion collective peut rendre possible un contrôle des surfaces irriguées et une baisse du prix de l'eau pendant les périodes de faible demande pour répartir la demande en eau pendant l'année. De plus, un Conseil d'Administration représentatif des différents groupes au sein du GIC et faisant des arbitrages explicites sur le tour d'eau devrait permettre une allocation de l'eau plus équitable.

Pour diminuer la pointe de demande en eau sur l'Adour en août, on peut envisager d'élargir la gamme des cultures semées, d'améliorer les réseaux de drainage de façon que les agriculteurs puissent planter plus tôt ou encore de cofinancer la création de ressources individuelles. Cependant, dans le contexte actuel, il est malheureusement probable que, sur les rivières sans barrage en tête de bassin, aucun système de gestion n'utilise les compteurs qui devraient être pourtant complètement installés en 2002.

L'objectif du chapitre est :

- d'envisager d'autres possibilités que l'allocation de l'eau pour diminuer les tensions entre ressource et demande ;
- de replacer la question de la distribution de l'eau dans un contexte plus large.

Autrement dit, après l'“envolée” de l'analyse économique, il est important d'atterrir en douceur et de compléter l'étude par la proposition de quelques solutions concrètes...

6.1 En Tunisie

6.1.1 Quel potentiel de gain entre changement des règles et changement du réseau ?

L'objectif consiste ici à **mettre en perspective le gain à attendre d'un changement de règles par rapport à celui d'une rénovation du réseau**. Nous reprenons la modélisation du GIC d'El Melalsa présentée en fin de chapitre 3, mais nous ajoutons des scénarios correspondant à un réseau rénové.

Le réseau actuel délivre 24 l/s, avec une perte qui va de 0% à 50%. La perte moyenne sera d'autant plus importante que la surface totale mise en culture sera plus grande. La rénovation du réseau devrait permettre d'atteindre un débit délivré de 30 l/s grâce à une diminution importante des pertes de charge et à une absence de pertes d'eau sur le réseau, soit au total une augmentation du volume distribuable de 40% environ. On peut alors définir des scénarios correspondant à un réseau rénové, par le biais d'une simple homothétie de rapport 1.4 à la fois sur les assolements irrigués et sur les résultats, à partir des 4 scénarios initiaux.

L'ensemble des triplets envisagés donne lieu à 9 scénarios différents (figure 6.1). En fait, quatre facteurs peuvent expliquer le mauvais fonctionnement d'El Melalsa : l'état du réseau, les règles de construction du tour d'eau, les choix d'assolement et l'équité de la distribution.

Les 9 scénarios étudiés ne permettent de comparer que ces trois premiers facteurs. Néanmoins, on peut considérer que la différence entre la valorisation qui a réellement eu lieu en 98-99 (scénario 0) et le scénario 1 est due en grande partie à l'iniquité de la distribution.

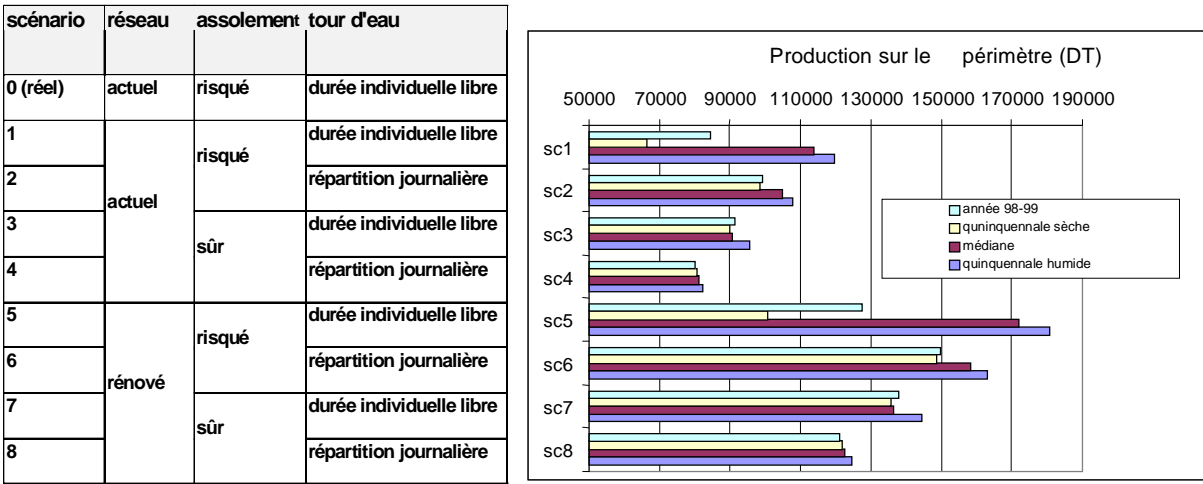


FIG. 6.1 – valorisation totale de l'eau sur le périmètre d'El Melalsa selon l'assolement, l'état du réseau, la règle de répartition et la pluviométrie

Le graphique montre que **la rénovation du périmètre constitue le principal potentiel d'amélioration**, mais aussi que **le choix de la surface totale mise en**

culture et de la règle de gestion ne sont pas du tout négligeables par rapport à ce potentiel d'amélioration technique.

6.1.2 Une rénovation vers un réseau en haute pression ou en basse pression ?

Il existe actuellement un débat sur les choix techniques à adopter lors de la rénovation des GIC (c.f. rapport SCET sur la rénovation de Bled Abida, 2000).

- Soit on choisit un réseau basse pression, complété par des bassins et des pompes individuels. Ce système n'est pas globalement efficace en termes d'investissement. Il permet néanmoins une grande souplesse de gestion et ne nécessite pas une maîtrise technique trop importante pour les aiguadiers. C'est le système adopté à Souaidia.

- Soit on choisit un réseau haute pression. Un tel réseau a été mis en place à El Melalsa à l'automne 2001. Ce système demande néanmoins beaucoup plus de technicité, même s'il est plus efficace "sur le papier".

La gestion collective va devenir une nécessité de plus en plus importante avec l'arrivée du goutte-à-goutte, en particulier pour les réseaux haute pression qui requièrent un haut niveau de coordination de l'irrigation.

6.1.3 Le GIC : un bon niveau de décentralisation

Dans l'ensemble, les agriculteurs ont bien accueilli la décentralisation des GIC. En effet, ils préfèrent que le paiement de l'eau participe à la constitution d'un compte propre au GIC plutôt que cet argent parte vers les lointaines caisses de l'Etat. Ce compte propre joue un rôle d'autant plus important qu'en cas de panne, l'été, les services du CRDA prennent beaucoup de temps pour intervenir car les GIC d'eau potable sont prioritaires : la trésorerie du GIC permet alors de se procurer rapidement les pièces nécessaires à la réparation.

Cette décentralisation n'est cependant pas complète : l'Etat garde la responsabilité des réparations les plus importantes, et notamment de l'entretien du réseau. A Souaidia, un contrat de gérance est ainsi signé entre l'Etat et le GIC : il détermine les responsabilités de chacun. La limite financière à partir de laquelle l'Etat intervient est de l'ordre de 25 000 DT.

L'élargissement des compétences de ces associations d'irrigants : une chance pour la gestion de l'eau ?

Dans le Centre et le Sud de la Tunisie, l'irrigation est une condition désormais nécessaire pour qu'une exploitation agricole puisse être viable économiquement. Là où la nappe est profonde, le creusement d'un puits représente un investissement important : l'eau du périmètre irrigué est la seule solution pour un bon nombre d'agriculteurs et, de fait, les GIC ont alors une vraie existence.

Dans le Nord du pays, en revanche, les GIC connaissent des difficultés pour prendre consistance, du fait du moindre besoin d'irriguer, de la présence du bassin d'emploi de Tunis et surtout de l'existence de grands réseaux. En effet, sur ces grands réseaux, le GIC ne gère alors plus qu'un canal tertiaire : les agriculteurs ne se sentent alors pas maîtres de la production et de la distribution de l'eau. Pour donner corps à ces GIC,

une solution peut consister alors à d'étendre les activités de coopératives, de l'amont à l'aval de la production (Alouini et Delacourt, 2000).

6.1.4 Quelques propositions

Maîtriser les surfaces mises en culture

A Souaidia, les agriculteurs réussissent collectivement à limiter la surface totale mise en culture pendant l'été. Il existe un mécanisme de contrôle, avec la possibilité de sanctions (voir chapitre 2 p. 96). Il faut inciter les GIC à mettre en place ce contrôle des surfaces.

Enfin, chaque GIC possède désormais sa salle de réunion, voire sa maison propre. Une aide pourrait consister simplement en la mise en place d'une grande carte du périmètre affichée dans la maison du GIC. Cette carte indiquerait les surfaces des différentes parcelles.

Répartir la demande en eau pendant l'année

Il ne faut pas attendre du changement de type d'irrigation une diminution sensible de la tension sur l'eau. Ainsi, à Souaidia, le piment, après la phase de développement, consomme presque autant d'eau en irrigation en goutte-à-goutte qu'en irrigation à la raie (la transpiration est beaucoup plus importante que l'évaporation). Un potentiel d'amélioration réside cependant dans le fait qu'à Souaidia comme à El Melalsa, les agriculteurs sèment pour l'essentiel les mêmes cultures : la demande en eau n'est pas du tout répartie sur l'ensemble de l'année.

Il faut donc développer des cultures qui permettent de répartir la demande sur l'ensemble de l'année. Par exemple, pour Souaidia, on pourrait augmenter les surfaces de cultures déjà expérimentées par quelques agriculteurs :

- tomates d'arrière- saison ;
- pomme de terre d'arrière - saison (fin août - début novembre) ;
- piment d'arrière - saison (mi-août - mi-octobre),
- melon d'arrière - saison (début juillet - fin septembre).

On peut envisager qu'une trentaine d'hectares soit mise en culture avec ces différentes cultures maraîchères. Cette politique de diversification doit évidemment être accompagnée par les centres locaux de vulgarisation.

Pour inciter les agriculteurs à planter d'autres cultures, on pourrait envisager de baisser le coût de l'eau pendant les périodes de faible tension sur la ressource. Cette baisse pourrait être justifiée par le fait que le choix d'un agriculteur de consommer de l'eau pendant les périodes de moindre demande bénéficie à toute la communauté puisque, du fait des contraintes culturelles, il consomme alors moins pendant les périodes de pointe. D'ailleurs, l'administration tunisienne incite déjà les GIC à baisser de moitié le prix de l'eau pour l'irrigation des céréales, comme cela se fait dans les périmètres publics, mais dans ce cas l'objectif est une autosuffisance nationale en céréales.

Baisser le prix de l'eau pendant les périodes de faible demande, inciter les agriculteurs à semer pendant ces périodes : ces propositions conduisent à une augmentation du prélèvement annuel du GIC dans la nappe de Kairouan. Or, cette nappe est actuellement largement surexploitée : ce qui pourrait être considéré comme bénéfique au

niveau du GIC ne l'est pas nécessairement au niveau du système ressource - usages de la nappe de Kairouan.

Cependant, compte-tenu du prix de l'eau tarifé par le GIC, les agriculteurs n'irriguent pas plus que nécessaire : la valorisation de l'eau sur ces périmètres est bonne. En revanche, les agriculteurs possédant des puits individuels n'ont qu'une très faible incitation à limiter les gaspillages d'eau. C'est avant tout au niveau de ces puits individuels que le problème de la surexploitation de la nappe doit être abordé.

Vers une eau plus transparente

A El Melalsa et dans d'autres périmètres étudiés se pose un problème d'équité de la répartition de l'eau. Pour diminuer ce manque d'équité, on peut proposer d'une part que les élections au Conseil d'Administration se fassent à bulletin secret, ou tout au moins que ce Conseil reflète les différentes familles présentes sur le GIC. Une rotation obligatoire des membres effectuant les arbitrages (Président et Conseil d'Administration), tous les 2 ans par exemple, peut aussi contribuer à éviter la création d'un groupe accaparant le pouvoir (Le Goulven, com. pers.).

D'autre part, il faut s'assurer que le Conseil ait réellement une voix lors des arbitrages pour le tour d'eau. Jusqu'en 2000, à El Melalsa, les arbitrages étaient effectués uniquement par le trésorier et l'aiguaidier.

Il serait important que dans les salles des GIC figurent des représentations stylisées du périmètre et du tour d'eau, et que l'aiguadier y indique quel argument a été invoqué à chaque fois que le tour d'eau théorique a été modifié.

6.2 Dans le bassin de l'Adour

Le chapitre 4 a présenté une analyse des différentes règles d'allocation de l'eau possibles dans le contexte d'une rivière sans retenue en tête de bassin, dans l'objectif d'assurer un débit d'étiage minimal pendant l'été. Il est possible d'envisager d'autres solutions que les règles d'allocation de l'eau pour contribuer à atteindre cet objectif.

Création de retenues individuelles

Les retenues individuelles permettent de diminuer la tension sur la ressource puisque l'eau qu'elles stockent a été collectée pendant l'hiver. En revanche, se pose pour la Collectivité la question du financement d'une grande retenue ou de l'aide à la construction de nombreuses retenues individuelles. Si les retenues individuelles ne participent pas au soutien d'étiage, elles permettent néanmoins de diminuer les prélèvements dans la rivière et peuvent être construites assez rapidement, alors qu'il faut maintenant compter de 10 à 20 ans pour l'autorisation puis la construction d'un grand barrage.

Electrifier les pompes

Si les équipements utilisés sont suffisamment homogènes, alors l'électrification des pompes permet d'utiliser les consommations électriques pour déterminer les prélèvements effectués. Cette solution pourrait intéresser les agriculteurs car l'utilisation et l'entretien sont beaucoup plus aisés. De plus, cette solution permettrait de revenir à des niveaux d'équipement collectivement acceptables, dans des bassins suréquipés : la Collectivité ne subventionnerait que des pompes d'une taille adaptée aux besoins (de

l'ordre de 0.7 l/s/ha dans cette région). Cependant, le passage d'une consommation donnée à un volume prélevé suppose que le niveau d'eau à l'aspiration soit constant, ce qui nécessiterait la mise en place systématique de seuils sur les rivières : le coût total pourrait être prohibitif.

Créer des réseaux de drainage

Lorsque les sols sont bien drainés, les agriculteurs peuvent semer tôt, ce qui leur permet de planter des variétés tardives qui ont besoin souvent de moins d'eau que les variétés précoces lors de la levée et qui, de plus, ont un pic de besoin en eau qui est situé avant la période d'étiage. Des subventions à la création de réseaux de drainage existent depuis plusieurs années. Cependant, bien que le drainage soit un moyen indirect assez efficace pour limiter le pic de demande en eau pendant l'étiage, ces subventions ont été revues à baisse depuis le nouveau contrat de plan Etat-Région en Midi-Pyrénées (Boubée, com. pers.).

Elargir la gamme des cultures utilisées

La tension sur la ressource provient aussi, comme sur le périmètre d'El Melalsa, du fait que tous les agriculteurs ont planté la même culture et doivent donc satisfaire un pic de besoin en eau au même moment.

Il est peu envisageable de décaler la date des semis. En effet, on ne peut avancer ces dates de semis car les agriculteurs sèment quasiment dès que les sols sont suffisamment secs pour que les machines puissent passer. Il serait aussi inutile de retarder les semis car les débits naturels sont souvent encore faibles à la fin du mois d'août (Chevallier, 2001).

En revanche, on pourrait envisager d'inciter les agriculteurs à planter d'autres cultures, telles que les cultures légumières. Les pics de besoin en eau sont situés plus tôt, à un moment où le débit de la rivière permet aisément l'irrigation.

Sur les bassins où la tension sur l'eau est très importante, on pourrait proposer à des agriculteurs qui peuvent semer tôt de choisir néanmoins de planter des variétés de maïs à cycle court ; ces agriculteurs seraient alors dédommagés à l'aide d'un fonds où contribueraient tous les agriculteurs, ou bien dans le cadre d'un CTE.

S'il est intéressant d'élargir la gamme des cultures plantées, cette gamme est néanmoins quasiment entièrement dictée par la valeur des primes PAC et la nécessité de récoltes garanties : il est peu probable que, localement, on parvienne à mettre en place des transferts monétaires d'une valeur suffisante pour modifier les arbitrages actuels.

Informar les irrigants

Dans le cadre des opérations Irrimieux menées dans de nombreux bassins en France, des structures d'information sur les données climatiques et les besoins des plantes ont été mises en place. Cependant, il est très difficile de mesurer l'impact des bulletins d'information sur les méthodes d'irrigation des agriculteurs.

Enfin, même si l'utilisation des compteurs est encore soumise à discussion, il y a un consensus pour dire que ces compteurs vont aider les agriculteurs - qui le souhaitent - à maîtriser leur irrigation et éviter les gaspillages.

Conclusion

Le tableau (6.1) propose un bilan des différents scénarios envisagés. Selon les circonstances, la meilleure règle dépendra du coût d'acquisition de l'information et de l'importance du risque de sur-équipement et d'irrigation stratégique.

TAB. 6.1 – différentes règles possibles pour diminuer la demande de pointe sur une rivière dont le débit n'est pas maîtrisé

Règle envisagée	Amélioration individuelle de la conduite de l'irrigation	Lutte contre l'irrigation stratégique	Lutte contre le sur-équipement stratégique	Diminuer la demande de pointe	Coût de la mise en place	Faisabilité économique
Quota à la campagne	oui	favorise l'irrigation stratégique	non	non	faible	forte
Quota hebdomadaire	oui	non	oui	oui	fort	possible
Quotas hebdomadaires avec épargne	oui	oui	oui	oui	fort	possible
Limitation de la puissance des pompe ou électrification	non	non	oui	oui	fort	forte
Changer de cultures ou de variétés	non	non	non	oui	fort	faible

Sur le Gabas, de toute façon, la mise en eau du barrage de Gardères-Eslourenties, prévue pour 2003, devrait permettre le passage à une gestion maîtrisée.

Pour l'Adour gersois, du fait de la taille importante du bassin et de la faible mobilisation des agriculteurs, il semble très difficile de mobiliser les fonds nécessaires pour mettre en œuvre des quotas hebdomadaires. **Il est malheureusement probable que, sur cette zone, les compteurs resteront des éléments “décoratifs” en attendant la construction de retenues.**

Conclusion

L'abus de l'eau est d'autant plus dangereux qu'il entraîne à la longue, chez l'hydromane, une dépendance quasi irréversible.

Pierre Desproges

Une thèse vaut - dit-on - plus pour la question posée que pour les résultats démontrés. C'est pourtant le rôle d'une conclusion générale que de proposer un bilan de ces résultats... Cependant, on ne résumera pas ici les différents apports chapitre par chapitre : les synthèses sont déjà faites sous la forme de résumé en tête de chaque chapitre. Une approche plus transversale des résultats est tentée ici.

Sur les différents chemins explorés au cours de ces 7 chapitres, a-t-on pu poser quelques jalons dans le monde de second rang de la gestion de l'eau ? Rappelons le problème : des agents différents, cette différence étant difficilement accessible au Gestionnaire, et un coût très important de contrôle des différentes actions possibles de ces agents.

Un premier résultat a été montré au chapitre 2 dans le cas de capacités individuelles à valoriser l'eau différentes, mais il peut être généralisé à toute caractéristique individuelle.

- A) Lorsque le Gestionnaire connaît la distribution des paramètres, il peut construire un mécanisme de révélation puis à partir de ce mécanisme une taxe équivalente si le mécanisme permet une allocation Pareto-optimale. Enfin, il peut “discrétiser” ce mécanisme de taxation par la définition d'un certain menu de contrats.**

Lorsque le Gestionnaire ne possède aucune information sur les paramètres individuels, il faut en revenir à des règles d'allocation plus traditionnelles. La thèse a pu alors permettre de comparer les efficacités relatives de ces règles en fonction des objectifs donnés et des caractéristiques du système. Les trois chapitres d'étude comparative de ces règles, les chapitres 2, 3 et 4, ont tous montré que la comparaison de ces efficacités dépendait toujours du contexte du système irrigué.

- B) Il n'existe pas de règle permettant d'“allouer l'eau au mieux” dans l'absolu : l'efficacité relative des règles dépend à la fois des objectifs fixés, des paramètres de production et de la structure du groupe d'agriculteurs.**

Lorsqu'on cherche à valoriser au mieux la ressource entre irrigants possédant des capacités différentes à valoriser l'eau, l'ordre de la comparaison entre les différentes règles

dépendra du degré d'hétérogénéité du groupe. En revanche, en univers incertain, les différentes règles étudiées comportent toutes des avantages et des inconvénients par rapport à tel ou tel objectif, et ce quel que soit le degré d'hétérogénéité du groupe vis-à-vis de l'aversion au risque.

- C) Lorsque le Gestionnaire n'a aucune information sur les caractéristiques individuelles, les règles d'allocation qui permettent une valorisation optimale de l'eau *ex post* ou un partage du risque créent des interactions stratégiques entre les agriculteurs. Ces interactions stratégiques sont toujours nuisibles pour la Collectivité.**

La modélisation effectuée dans le cas du périmètre irrigué d'El Melalsa a confirmé une proposition notée lors de la revue de littérature : en absence de négociation, l'équilibre de Nash traduit bien les réalités observées dans de nombreux cas de ressources en bien commun (Ostrom, 2000). De façon plus générale, si la théorie des jeux coopératifs peine à prévoir le résultat d'une négociation dans ces cas-là, la théorie non coopérative possède un pouvoir prédictif fort lorsque, suite à une négociation ou non, chaque acteur "retourne dans son coin" pour faire ses propres choix.

- D) Dans le cadre de l'application d'une règle donnée, l'équilibre de Nash donne une bonne lecture de la résultante des interactions stratégiques entre agriculteurs. Cet équilibre non coopératif se produit même sur un petit périmètre et, de plus, avec une vitesse de convergence rapide.**

Le résultat issu de l'étude de terrain comme les résultats d'économie expérimentale valident l'hypothèse de l'utilisation de l'équilibre de Nash pour représenter l'impact de règles autorisant des marges de manœuvres individuelles. Les résultats précédents contribuent alors à répondre à la question : faut-il toujours chercher, par le choix des règles, à diminuer les externalités que ces marges de manœuvre rendent possibles ? On a vu au chapitre 2 que, lorsque le groupe était hétérogène dans la capacité à valoriser l'eau, l'allocation *ex post* permettait de mieux valoriser l'eau que l'allocation *ex ante*. Cependant, cette forme de "laissez-faire" donne un résultat particulièrement inéquitable. Le résultat en univers incertain semble en revanche plus porteur d'applications éventuelles.

- E) Le partage du risque par le biais de l'allocation de l'eau ne peut fonctionner durablement que s'il existe une rotation entre les agriculteurs sur les prises de risque. De plus, ce partage crée une possibilité de sur-prise de risque collective que la Collectivité devra contrôler. Moyennant ces deux objections, le partage du risque par le biais de l'allocation de l'eau peut constituer une solution alternative efficace et peu coûteuse par rapport aux assurances extérieures au système irrigué.**

Enfin, ces marges de manœuvre peuvent avoir un impact important sur la gestion du système, comme cela a été montré au début du chapitre 6.

F) En raison de ces marges de manœuvre, le choix des règles collectives de gestion de l'eau constitue un paramètre non négligeable par rapport à celui de l'accès à l'eau ou celui de la création de nouvelles ressources en eau, dans les pays du Sud comme du Nord.

Enfin, d'un point de vue de recherche appliquée, **un apport important de ce travail est de calculer un équilibre de Nash dans une situation de ressource en bien commun avec des fonctions de production et des programmes de maximisation réalistes.**

Ces questions ont été illustrées sur deux cas d'étude : de petits périmètres irrigués gérés par des associations d'irrigants en Tunisie et des parties du bassin de l'Adour où le débit de la rivière n'est pas maîtrisé par un barrage en amont.

En Tunisie, les agriculteurs ont créé leurs propres règles d'allocation, d'une équité et d'une efficacité très variables d'un périmètre à l'autre. Les règles *ex post* sont souvent utilisées ; cependant elles sont parfois détournées par les dirigeants qui distribuent alors l'eau selon leur bon vouloir. Il est avant tout nécessaire de rendre l'application des règles plus explicite, par exemple avec la mise en place d'un tableau indiquant le tour d'eau et les règles d'allocation avancées lors d'une modification de celui-ci. En cas de problèmes importants d'équité sur des périmètres où les agriculteurs sont hétérogènes dans leur capacité à valoriser l'eau, on pourra envisager de recourir à une limitation des surfaces mises en culture, même si l'analyse précédente a montré qu'une telle limitation ne conduirait pas nécessairement à une meilleure valorisation collective de l'eau.

Sur l'Adour, l'inefficacité actuelle de la gestion collective de l'eau provient d'un système très frustré d'allocation. Des mécanismes plus efficaces peuvent être mis en œuvre sur de petites rivières mais ils seront probablement très difficiles à utiliser sur de plus grandes zones telles que l'Adour gersois, avant tout en raison d'un manque de financement.

Dans le futur, **les outils d'acquisition de l'information vont devenir de moins en moins onéreux**, par exemple les compteurs couplés avec des émetteurs dans le bassin de l'Adour. De nouvelles règles de répartition pourraient être utilisées, avec un contrôle possible plus important des décisions des irrigants. Néanmoins, il est probable que, pour des questions techniques, le contrôle des surfaces mises en culture sur les grands périmètres irrigués tels qu'en Inde ou au Pakistan par exemple, reste encore impossible pour de nombreuses années à venir. Quant au cas français, il sera probablement politiquement très difficile de mettre en œuvre un tel contrôle.

Il est donc probable qu'il faudra dans les années à venir toujours raisonner dans une situation d'asymétrie d'information. Dans ce contexte, parce qu'il est inévitable que les acteurs pourront toujours s'affranchir partiellement d'une règle donnée voir la contourner complètement, il sera de plus en plus important de sécuriser les objectifs à atteindre et la liste des acteurs concernés, et de s'assurer d'une mise en œuvre facile des mécanismes de révision et de changement de règle (Weber, com. pers.). Par ailleurs, l'avenir est aussi à une formalisation plus poussée des mécanismes de gestion de l'incertitude, et notamment de partage du risque.

Extensions possibles du travail théorique

Il serait d'abord intéressant de **définir des axiomes d'équité et de déterminer quels axiomes sont respectés par chacune des règles d'allocation étudiées** ; ce lien entre axiomes et règles d'allocation constituerait un parallèle à l'étude de Aadland et Kolpin (1998) sur le partage des coûts dans un périmètre irrigué (voir p. 185). Les critères mis en avant par les irrigants d'un système irrigué permettraient alors de sélectionner, parmi l'ensemble des règles envisageables, celles qui seront considérées comme équitables.

Comme cela a été esquissé au chapitre 5, **les résultats précédents peuvent servir de base pour élaborer une théorie de la négociation des règles**, par exemple en jeux coopératifs ou avec des modèles de marchandage.

Le concept d'équilibre de Nash a permis de définir une solution d'équilibre aux interactions stratégiques entre agriculteurs. Une modélisation par le biais de **Systèmes Multiagents** permettrait de s'intéresser à la dynamique de convergence vers cet équilibre, mais aussi de simuler des méthodes plus complexes de communication entre agents.

Il serait intéressant de chercher à **quantifier les différents coûts d'information**.

- Les **coûts de connaissance d'une caractéristique individuelle** ont été supposés prohibitifs dans les chapitre 2 et 3. Une quantification de ces coûts permettrait alors de choisir de façon plus précise un niveau d'acquisition de l'information sur les caractéristiques individuelles.

- La connaissance des **coûts de connaissance des comportements individuels** permettrait de quantifier l'analyse qualitative effectuée au chapitre 4.

- Il serait enfin nécessaire d'estimer les **coûts de transaction associés aux différentes règles** ; il n'existe pour l'instant que quelques rares tentatives d'estimation de ces coûts de transaction. Une simulation des marchés de l'eau dans la vallée du Guadalquivir en Espagne a permis, par exemple, de montrer que le marché de l'eau ne pourrait fonctionner que pour un coût de transaction inférieur à 2 pesetas/m³ (environ 8 centimes/m³)(Garrido, 2000).

Enfin, l'approche formelle développée ici pourrait être adaptée à **d'autres ressources naturelles renouvelables telles que la pêche**. Il faudra néanmoins alors se placer dans un cadre dynamique, i.e. passer de l'allocation d'une ressource annuelle à la gestion inter-annuelle d'un stock.

Quelles applications pratiques d'une telle recherche ?

Une part importante de la recherche en économie consiste à montrer pourquoi, et dans quelle mesure, des choix existants d'institutions et de règles de gestion sont efficaces. Il se pourrait néanmoins que, contrairement à ce que peuvent penser les pessimistes, *les économistes puissent faire des découvertes*. Des mécanismes tels que l'écriture d'un menu de contrats dérivé d'une taxe, elle-même fondée un mécanisme de révélation, ou bien la répartition des coûts en série, constituent des techniques qui pourraient s'avérer intéressantes en pratique pour la gestion de l'eau.

Cette recherche a établi quelques repères entre objectifs et caractéristiques du système d'une part, et règles de gestion d'autre part. Cependant, l'approche formelle est évidemment bien trop épurée pour que ses résultats puissent être appliqués directement. De plus, un des résultats de cette thèse est qu'il n'existe pas de "bonne" règle dans

l'absolu : il est donc nécessaire de déterminer dans le cas précis de chaque système irrigué l'impact des différentes règles envisageables.

La modélisation faite sur le périmètre d'El Melalsa a donné des résultats concrets mais s'est révélée très lourde à mettre en œuvre. C'est pour cette raison qu'un logiciel de simulation économique à l'échelle des périmètres irrigués, SLEEPi, a été développé (voir une brève présentation en annexe C). Ce logiciel permet de modéliser les choix d'assolement des agriculteurs lorsqu'ils prennent en compte l'impact sur les rendements de futurs déficits en eau. Ce logiciel va pouvoir aussi calculer, en fonction d'une règle d'allocation donnée sur l'ensemble d'un périmètre irrigué, l'équilibre de Nash sur les choix d'assolement. La recherche de thèse pourrait alors servir de référence pour des études de terrain accompagnées d'une modélisation utilisant SLEEPi.

Bibliographie

- AADLAND, D. et KOLPIN, V. (1998). Shared irrigation costs : an empirical and axiomatic analysis. *Mathematical Social Sciences*, 849 :203–218.
- ADAMS, W., WATSON, E. et MUTISO, S. (1997). Water rules and gender : Water rights in an indigenous irrigation system, Marakwet, Kenya. *Development Change*, 28 :707–730.
- AGENCE de l'Eau Adour-Garonne (1996). Cahier géographique Adour.
- AGENCE de l'Eau Adour-Garonne (1999). Tableau de bord du SDAGE.
- ALAOUZE, C. (1991). Transferable water entitlements which satisfy heterogeneous risk preferences. *Australian Journal of Agricultural Economics*, 35, 2.
- ALLAIN, S. (2000). Application de la loi sur l'eau et processus de négociation entre la profession agricole et l'administration. Limiter l'irrigation sans nuire à la production agricole. *Gérer et Comprendre*, juin.
- ALOUINI, A. et DELACOURT, A. (2000). Analyse diagnostique d'un périmètre irrigué. Apprentissage méthodologique par étude de cas. Secteurs irrigués de Bejaoua et Jebel Ammar sud, Gouvernorat de l'Ariana. Session de formation ENGREF-INAT du 27 mars au 8 avril 2000.
- AMBEC, S. et SPRUMONT, Y. (2001). Sharing a river. In *4èmes journées d'économie de l'environnement de Toulouse*.
- ARNOTT, R. et STIGLITZ, J. (1991). Moral hazard and nonmarket institutions : dysfunctional crowding out or peer monitoring? *American Economic Review*, 81 (1) : 179–190.
- AUBIN, J.-P. (1997). *Dynamic Economic Theory*. Ed. Springer.
- BABCOCK, B. (1990). Acreage decisions under marketing quotas and yield uncertainty. *American Journal of Agricultural Economics*.
- BABCOCK, B. et HENNESSY, D. (1996). Input demand under yield and revenue insurance. *American Journal of Agricultural Economics*, 78, mai.
- BALAND, J. et PLATTEAU, J., éditeurs (1996). *Halting Degredation of Natural Resources, is there a role for Rural Communities ?* FAO and Clarendon Press, Oxford.
- BALAND, J. et PLATTEAU, J. (1997). Wealth inequality and efficiency in the Commons. Part i : the unregulated case. *Oxford Economic Papers*, 49.
- BALAND, J. et PLATTEAU, J. (1998). Wealth inequality and efficiency in the Commons. Part ii : the regulated case. *Oxford Economic Papers*, 50.
- BALAND, J. et PLATTEAU, J. (1999). The ambiguous impact of inequality on local resource management. *World Development*, 27 (5).

- BANDARAGODA, D. (1998). Design and practice of water allocation rules : lessons from warabandi in Pakistan's Punjab. IWMI Research Report 17.
- BARATON, E. (2001). Analyse de la gestion volumétrique de l'eau d'irrigation dans le département des Deux-Sèvres. ESA Purpan, Toulouse.
- BARDHAN, P. (1993). Symposium on management of local commons. *Journal of Economic Perspectives*, 7 (4) fall.
- BARDHAN, P. (2000). Irrigation and cooperation : an empirical analysis of cooperation on irrigation in South India. *Economic Development and Cultural Change*, 48 :847–865.
- BARDHAN, P., GHATAK, M. et KARAINOV, A. (2000). Inequality and collective action problems. Working Paper.
- BARRAQUE, B. (1995). *Les politiques de l'eau en Europe*. Ed. La decouverte.
- BAUER, C. (1997). Bringing water markets down to earth : the political economy of water rights in Chile, 1976-95. *World Development*, 25 (5) : 639–656.
- BAUER, C. (1998). Slippery property rights : Multiple water uses and the neoliberal model in Chile, 1981-1995. *Natural Resources Journal*, 38, winter.
- BEDOUCHA, G. (1984). *L'eau, l'ami du puissant*. Editions des archives contemporaines, CNRS, Paris.
- BELLAUD, E., BUISSON, A., EPAULIER, S., JACQUOT, B., JUDEAUX, S., MAN-CEAU, M. et TEMPLIER, M. (2000). Irrigation du maïs dans le bassin du Lambon. Groupe ESA Angers.
- BEN HAMOUDA, N. (1999). Stratégie des agriculteurs irrigants confrontés à une situation de pénurie d'eau. Cas d'un périmètre irrigué privé dans le bassin du Merguellil en Tunisie centrale. Institut Agronomique Méditerranéen, rapport de Master.
- BENNETT, L. et HOWE, C. (1998). The interstate river compact : Incentives for noncompliance. *Water Resources Research*, 34 (3) :485–495.
- BERCK, P. et LIPOW, J. (1994). Real and ideal water rights. Division of Agriculture and Natural Resources, University of Berkeley.
- BERGSTROM, T., BLUME, L. et VARIAN, H. (1986). On the private provision of public goods. *Journal of Public Economics*, 29 : 25–49.
- BERKES, F., FEENY, D., McCAY, B. et ACHESON, J. (1989). The Benefits of the Commons. *Nature*, 340.
- BESTER, H. et GUTH, W. (1998). Is altruism evolutionarily stable? *Journal of Economic Behavior and Organization*, 34 :193–209.
- BEUCHER, Y. (2000a). Diagnostic des usages de l'eau sur le bassin versant du Gabas. Chambre d'Agriculture des Pyrénées Atlantiques.
- BEUCHER, Y. (2000b). Etat d'avancement du projet Irrimieux sur le bassin versant du Gabas (Pyrénées Atlantiques). Chambre d'Agriculture des P.A.
- BINMORE, K. (1992). *Fun and Games*. Heath, Lexington.
- BLOMQUIST, W. (1992). *Governing groundwaters in Southern California*. ICS Press, San Francisco.

- BONTEMS, P. et ROTILLON, G. (1999). Conformité aux prescriptions environnementales et son contrôle. *Revue d'Economie Politique*, 109 (1) :1–34.
- BOURGEOIS, H. (2001). Tours d'eau sur le Saleys : les irrigants prennent des initiatives. *Le sillon Gers -Landes - Pyrnes Atlantiques*, 10 août
- BOWEN, R., MONCUR., J. et POLLOCK, R. (1991). Rent seeking, wealth transfers and water rights : The Hawai case. *Natural Resources Journal*, 31, winter :429–448.
- BRENNAN, D. et SCOCCIMARRO, M. (1999). Issues in defining rights to improve Australian water markets. *Australian Journal of Agricultural and Resources Economics*, 43 :1.
- BREWER, D., SAKTHIVADIVEL, R. et RAJU, K. V. (1997). Water distribution rules and water distribution performance : a case study in the Tambraparani irrigation system. Research report no. 12, International Irrigation Management Institute.
- BRILL, E., HOCHMAN, E. et ZILBERMAN, D. (1997). Allocation and pricing at the water district level. *American Journal of Agricultural Economics*, 79 (aot).
- BURNESS, S. et QUIRK, J. P. (1979). Appropriative water rights and the efficient allocation of resources. *The American Economic Review*, Vol 69 (1).
- CAILLAUD, B., JULLIEN, B. et PICARD, P. (1996). Information et organisation des processus de décisions publiques. *Revue d'Economie Politique*, 106 (jan-fev).
- CAILLE, A. (1994). Présentation de l'ouvrage. In *A qui se fier ? Confiance, interactions et théorie des jeux*, volume 4.
- CARDENAS, J. (2000). Real wealth and experimental cooperation : Evidence from the fields. In *IASCP 2000 Conference*.
- CARDENAS, J.-C. et OSTROM, E. (2001). What do people bring into the game ? How norms help overcome the Tragedy of the Commons. In *4ème Journées d'Economie de l'Environnement de Toulouse*.
- CARTER, M. (1987). Risk sharing and incentives in the decollectivization of agriculture. *Oxford Economic Papers*, 39.
- CHAKRAVORTY, U. et ROUMASSET, J. (1991). Efficient spatial allocation of irrigation water. *American Journal of Agricultural Economics*, fev.
- CHAUDRY, M. et YOUNG, R. (1990). Economic impact of alternative water allocation institutions : Pakistan's warabandi system. In Sampath, R. K. et Young, R. A., editors, *Social Economic and Institutional issues in third world irrigation management*. Westview Press, Boulder.
- CHEVALLIER, S. (2001). Comportement stratégique des agriculteurs face au système réglementaire de gestion de l'eau : application dans le bassin de l'Adour. Cemagref.
- COIRON, P., KIRMAIER, J., PARIS, P., PLANCHARD, F. et VIDAL, H. (2001). La gestion de l'eau dans le bassin de la Boutonne. DAA AGER de l'INA PG, Paris.
- COLBY, B. (1990). Transactions costs and efficiency in Western water allocation. *American Journal of Agricultural Economics*, dec.
- COLBY, B. (1995). Bargaining over agricultural property rights. *American Journal of Agricultural Economics*, 77 :1186–1191.
- CORNES, R. et SANDLER, T. (1983). On Commons and Tragedies. *American Economic Review*, 83 (4) :787–92.

- COUTURE, S. (2000). *Aspects dynamiques et aléatoires de la demande en eau d'irrigation*. Thèse, Université des Sciences Sociales de Toulouse.
- DAYTON-JOHNSON, J. (2000a). Choosing rules to govern the commons : a model with evidence from Mexico. *Journal of Economic Behavior and Organization*, 42.
- DAYTON-JOHNSON, J. (2000b). Determinants of collective actions on the local Commons : a model with evidence from Mexico. *Journal of Development Economics*, 62.
- DAYTON-JOHNSON, J. et BARDHAN, P. (2001). Inequality and conservation on the local commons : a theoretical exercise. In *4ème Journées d'économie de l'environnement de Toulouse*.
- DE JANVRY, A., MCCARTHY, N. et SADOULET, E. (1998). Endogenous provisions and appropriation in the Commons. *American Journal of Agricultural Economics*, 80, aot.
- CHAMBRE Départementale de l'Agriculture des Deux-Sèvres. (1999). Dossier de candidature Irrimieux pour le bassin du Lambon.
- DINAR, A. (1997). Droughts, crisis management and water rights : an international perspective. In *4th Workshop on Joint Management of Shared Aquifers*, Istanbul, Turkey.
- DUDLEY, N. (1992). Water allocation by markets, common property and capacity sharing : Companions or competitors. *Natural Resource Journal*, 32, fall.
- EUREKA-BTE (1999). Analyse et planification des AIC d'eau potable et d'irrigation, gouvernorat de Kairouan. Rapport pour le Ministère de l'Agriculture Tunisien
- EYCKMANS, J. et TULKENS, H. (2001). Simulating coalitionally stable burden sharing agreements for the climate change problem. In *4ème Journées d'économie de l'environnement de Toulouse*.
- FAO et IWMI (1995). Irrigation Management Transfer Report. Chine, Wuhan.
- FARRELL, J. et SCOTCHMER, S. (1988). Partnerships. *Quarterly Journal of Economics*, mai :279–297.
- FAYSSE, N. (1998). L'eau entre Etat et usager dans le bassin de l'Adour : de la gestion réglementaire à la gestion concertée? Mémoire de DEA Sciences de l'eau dans l'Environnement Continental, Montpellier II et ENGREF.
- FAYSSE, N. (2000). Analyse couplée du fonctionnement technique et social d'un réseau d'irrigation : le cas des groupements d'intérêt collectif sur la nappe de Kairouan en Tunisie. In *Séminaire d'hydrologie*, Montpellier, 12-13 octobre.
- FAYSSE, N. et MORARDET, S. (1999). La mise en place d'une gestion négociée de l'eau en France : l'exemple de la gestion des étiages sur le bassin de l'Adour. In *Ed du Congrès de la CIID à Grenade*.
- FERNANDEZ, S. (2001a). Analyse économique et institutionnelle d'un système de gestion en propriété commune de la ressource en eau de surface destinée à l'irrigation : le cas de la Huerta valencienne au sud de l'Espagne. Dossier de candidature à une formation par la recherche. ENGREF.
- FERNANDEZ, S. (2001b). Etude des périmètres irrigués dans la région de Maniçoba au Brésil. Mémoire de DEA Economie de l'Environnement, Paris.

- FEUILLETTE, S. (2001). *Vers une gestion de la demande sur une nappe en accès libre : exploration des interactions ressources usages par les systèmes multi-agents*. 'Thèse en sciences de l'eau dans l'environnement continental, Montpellier II.
- FLEURBAEY, M. (1996). *Théories économiques de la justice*. Economica.
- FUDENBERG, D. et TIROLE, J. (1991). *Game theory*. Massachusetts Institute of Technology.
- FUNAKI, Y. et YAMATO, T. (1999). The core of an economy with a common pool resource : a partition function form approach. *International Journal of Game Theory*, 28.
- GARDNER, R., HERR, A., OSTROM, E. et WALKER, J. (2000). The power and limitations of proportional cutbacks in CPR. *Journal of Development Economics*, 62.
- GARRIDO, A. (2000). A mathematical programming model applied to the study of water markets within the Spanish agricultural sector. *Annals of Operation Research*, 94.
- GASPART, F. et SEKI, E. (2000). Sharing, heterogeneity and status considerations : Incentive theory and empirical evidences. In *IASCP 2000 Conference*.
- PREFECTURE du Gers. (2000). Arrêté portant interdiction des prélèvements d'eau dans l'Adour, ses canaux dérivés et sa nappe d'accompagnement.
- GILBERT, G. et PICARD, P. (1996). Incentives and the optimal size of local jurisdictions. *Revue d'économie politique*, 106 (jan-fev).
- GILLINGHAM, M. (1999). Gaining access to water : Formal and working rules of indigenous irrigation management on mount Kilimanjaro, Tanzania. *Natural Resource Journal*, 39.
- GILOT, L. (1994). L'eau des livres et l'eau des champs. Des règles de distribution à leur mise en pratique. Principes généraux et analyse au cas d'Urcuqui. Thèse, Montpellier.
- GOLLIER, C. (1999). *The economics of risk and time*. Disponible sur le site Internet de l'IDEI, Toulouse.
- GOLLIER, C. et EECKHOUDT, L. (1993). *Les risques financiers : évaluation, gestion et partage*. Mc Graw Hills, Paris.
- GRIFFIN, R. et HSU, S. (1993). The potential for water market efficiency when instream flows have value. *American Journal of Agricultural Economics*, 75, mai.
- GRIFFON, M. (2001). Conférence sur les biens publics mondiaux. Journées du CIRAD, Montpellier, septembre.
- GUESNERIE, R. (1995). *A contribution to the pure theory of taxation*. Cambridge university press edition.
- HAMILTON, J., WITTLESEY, N. et HALVERSON, P. (1989). Interruptible water markets in the pacific Northwest. *American Journal of Agricultural Economics*, fev.
- HANOT, S. (1999). La gestion volumétrique en Beauce. Cemagref.
- HARDIN, G. (1968). The Tragedy of the Commons. *Science*, 162 :1243–1248.
- HECKATHORN, D. (1996). The dynamics and dilemmas of collective action. *American Sociological Review*, 61 : 250–277.

- HOFSTADTER, D. (1981). *Gödel, Escher, Bach, les brins d'une guirlande éternelle*. Interéditions.
- HOLMSTROM, B. (1982). Moral hazard in teams. *BELL Journal of Economics*, Vol 13.
- HOLMSTROM, B. et MILGROM, P. (1987). Aggregation and linearity in the provision of intertemporal incentives. *Econometrica*, 55 (2).
- HOMANS, F. et WILEN, J. (2001). Markets and rent dissipation in regulated open access fisheries. In *4ème Journées d'économie de l'environnement de Toulouse*.
- HOWE, C. (1990). Equity versus efficiency in Indonesian Irrigation : An economic evaluation of the PASTEN Method. In *Social, Economic and Institutional Issues in Third World Irrigation Management*. Westview Press, Boulder.
- HOWE, C. W., SCHURMEIER, D. R. et SHAW, W. D. (1995). Innovative approaches to water allocation : the potential for water markets. *Water Resources Research*, 22 (4) :439–445.
- HYDE, C. et VERCAMMEN, J. (1997). Costly yield verification, moral hazard and crop insurance contract form. *Journal of Agricultural Economics*, 48 (3).
- IRRIMIEUX (1999). Gestion collective d'une ressource commune. Des "droits de l'eau" à la gestion collective de l'eau. étude de cas : tome i.
- ITO, M., SAIJO, T. et UNE, M. (1995). The Tragedy of the Commons revisited. Identifying behavioral principles. *Journal of Economic Behavior and Organization*, 28 :311–335.
- ITOH, M. (1991). Coalitions, incentives and risk sharing. *Journal of Economic Theory*, Vol 60.
- JERICICH, S. (1997). California's 1995 water bank program : Purchasing water supply option. *Journal of Water Resources Planning and Management*, jan-fev 1997.
- JOHANSSON, R. (2000). Pricing irrigation water. A literature survey. Policy research working paper. 2449. World Bank edition.
- JULLIEN, B., SALANIE, B. et SALANIE, F. (2000). Screening risk-averse agents under moral hazard. INSEE.
- JURRIENS, R. et MOLLINGA, P. (1996). Scarcity by design : protective irrigation in India and Pakistan. *ICID Journal*, 45 (2) :31–53.
- KEFFI, M. (1998). Valorisation de l'eau dans les périmètres irrigués de la plaine de Kairouan. Rapport de fin d'étude, Institut National Agronomique de Tunis.
- KEPINGLER, K., McCARL, B., CHOWDHURY, M. et LACEWELL, R. (1998). Economic and hydrologic implications of suspending irrigation in dry years. *Journal of Agricultural and Resources Economics*, 23(1) :191–205.
- KESER, C. et GARDNER, R. (1999). Strategic behavior of experienced subjects in a Common Pool Resource game. *International Journal of Game Theory*, 28.
- KIMBALL, M. (1988). Farmers' cooperatives as behavior toward risk. *American Economic Review*, march, 78 (1).
- INSTITUTION Interdépartementale pour l'Aménagement Hydraulique de l'Adour (1999). Plan de gestion des étiages du bassin de l'Adour en amont d'Audon.

- LAFFONT, J. (1985). *Cours de théorie microéconomique*, Vol 1 et 2. Economica.
- LAFFONT, J. (1988). *Fondements de l'Economie Publique. Vol 1. Cours de théorie microéconomique*. Ed. Economica.
- LARDILLEUX, S. (2000). Fonctionnement de périmètres irrigués à différents stades d'évolution en Tunisie centrale. Analyse des irrigations par modélisation du bilan hydrique. ENGEES, projet de fin d'études.
- LASSERRE, P. et SOUBEYRAN, A. (2001). A ricardian model of the Tragedy of the Commons. In *4ème Journées d'économie de l'environnement de Toulouse*.
- LE BOURHIS, J. (1996). Des riverains à la rivière. Les transformations d'une politique de l'eau.
- LE GENTIL, A. (1986). Création de périmètres irrigués en Haïti. Rôles du projet et des usagers dans la conception, la réalisation et la gestion des aménagements. In *Aménagement Hydro-Agricoles et Systèmes de Production*. CIRAD/DSA.
- LE MOIGNE, G., EASTER, W., OCHS, W. et GILTNER, S. (1992). Water policy and water markets. World Bank Technical Paper 249.
- LIGON, E. (1998). Risk sharing and information in village economies. *Review of Economic Studies*, 65.
- LIVINGSTONE, I. et HAZLEWOOD, A. (1979). The analysis of risk in irrigation projects in Developing Countries. *Oxford Bulletin of Economics and Statistics*, 41 (1), fev.
- LUND, S. et FAFSCHAMPS, M. (1997). Risk sharing networks in rural Philippines. Mc Kinsey Consulting Group and Stanford University, Working paper.
- MAHUL, O. (1999). Optimum area yield crop insurance. *American Journal of Agricultural Economics* 81, fev.
- MAHUL, O. et VERMERSCH, D. (2000). Hedging crop risk with yield insurance futures and options. *European Review of Agricultural Economics*, 27 (2).
- MANCUSO, C. (2001). Développement du logiciel Sleepi. ISIM, Montpellier, rapport de stage de 3ème année.
- McAFEE, R. et McMILLAN, J. (1991). Optimal contracts for teams. *International Economic Review*, vol 32 (3) :561–577.
- McCARTHY, N. (2000). Production risk and Common Pool Resources : Impact on externalities, profits and welfare. International Food Policy Research Institute.
- McCARTHY, N. (2001). Rainfall variability, traditional and commercial rangelands management and the drought cycle : some theoretical considerations and empirical evidence from Ethiopia. In *4ème Journées d'économie de l'Environnement de Toulouse*.
- McGINNIS, M. (2000). *Polycentric Games and Institutions*. Michigan Press.
- MERMET, L. (1998). Place et conduite de la négociation dans les procédures de décision complexes : l'exemple d'un conflit d'environnement. In *La négociation*. Ed. Nathan.
- MICHELSSEN, A. (1994). Administrative, institutional and structural characteristics of an active water market. *Water Resource Bulletin*, 30 (6).

- MICHELSSEN, A. et YOUNG, R. (1993). Optioning agricultural water rights for urban water supplies during drought. *American Journal of Agricultural Economics*, 75, nov.
- MONTGINOUL, M. (1997). *Une approche économique de la gestion de l'eau pour l'irrigation : des instruments, des informations et des acteurs*. Thèse, Université d'économie de Montpellier I.
- MONTGINOUL, M. (1998). Des instruments économiques pour la gestion de l'eau : concurrence ou complémentarité? In *L'irrigation et la gestion collective de l'eau en France et dans le monde*, Montpellier, les 19 et 20 novembre 1998.
- MONTGINOUL, M. (1999). Prise en compte des asymétries d'information pour la gestion de la ressource en eau : le cas du fleuve Charente. In *PIREE Strasbourg 1999*.
- MONTGINOUL, M. et RINAUDO, J.D. (1999). Utilisation des systèmes de quotas pour la résolution des conflits d'usages de l'eau entre agriculture et environnement. In *PIREE, Strasbourg, 2 et 3 décembre*.
- MOULIN, H. (1988). *Axioms of cooperative decision making*. Econometric Society Monographs. Cambridge University Press.
- MOULIN, H. (1990). Joint ownership of a convex technology : Comparison of three solutions. *Review of Economic Studies*, 57 :439–452.
- MOULIN, H. (1996). Cost sharing under increasing returns : A comparison of simple mechanisms. *Games and Economic Behavior*, 13 :225–251.
- MURGAI, R. (1998). Skirting the rules : Collective management and informal exchange of formal water rights in Pakistan. In *African edition of IASCP*.
- NETANYAHU, S. (1998). *Bilateral Cooperation on Transboundary Water Resources : the case of the Israeli-Palestinian Mountain Aquifer*. Thèse, Maryland.
- NUGENT, J. et SANCHEZ, N. (1998). Common property rights as an endogeneous response to risk. *American Journal of Agricultural Economics* 80, aug.
- OLSON, M. (1965). *The Logic of Collective Action : Public Goods and the Theory of Groups*. Cambridge, Harvard University Press.
- OSTROM, E. (1990). *Governing the Commons : the evolution of Institutions for Collective Actions*. Cambridge University Press.
- OSTROM, E. (1992). *Crafting institutions for self-governing irrigation systems*. Institute for Contemporary Studies Press.
- OSTROM, E. (1996). Pour des systèmes irrigués autogérés et durables : façonner les institutions, traduction et synthèse de P. Lavigne Delville. *Inter-reseaux GRET*, août.
- OSTROM, E. (2000a). A behavioral approach to the rational choice theory of collective action. In *Polycentric Games and Institutions*. Michigan Press, ed. Mc Ginnis.
- OSTROM, E. (2000b). Collective action and the evolution of social norms. *Journal of Economic Perspectives*, 14(3), summer :137–158.
- OSTROM, E. (2001). What have we learned about Common Pool Resource problems? In *4ème Journées d'économie de l'environnement de Toulouse*.

- OSTROM, E. et GARDNER, G. (1993). Coping with asymmetries in the Commons : Self-governing irrigation systems can work. *Journal of Economic Perspectives*, Vol 7, 4, fall 1993.
- OSTROM, E., GARDNER, R. et WALKER, J. (1994). *Rules, Games and Common Pool Resources*. University of Michigan Press.
- PERENNES, J.-J. (1993). *L'eau et les hommes au Maghreb*. Ed. Karthala.
- PERRY, C. et NARAYANAMURTHY, S. (1998). Farmer response to rationed and uncertain irrigation supplies. Research Report 24, IWMI.
- PICARD, P. (1994). *Eléments de microéconomie tome 1. Théorie et applications*. Ed. Montchrestien.
- POPE, R. et JUST, R. (1991). On testing the structure of risk preferences in agricultural supply analysis. *American Journal of Agricultural Economics*, aug 1991.
- POTKANSKI, P. et ADAMS, W. (1998). Water scarcity, property regimes and irrigation management in Sonjo, Tanzania. *Journal of Development Studies*, 34 (4) : 86–116.
- PROVENCHER, B. et BURT, O. (1993). The externalities associated with common property exploitation of groundwater. *Journal of Environmental Economics and Management*, 24 : 139–158.
- RAMASWAMI, B. (1993). Supply response to agricultural insurance : Risk reduction and moral hazard effects. *American Journal of Agricultural Economics*, 75, nov.
- RANVOISY, M. (2001). Rôle des associations d'irrigants au Maghreb (Tunisie et Maroc) dans le contexte de dsengagement de l'Etat. Synthèse bibliographique, ENGREF Montpellier.
- RAY, D. et UEDA, K. (1996). Egalitarianism and incentives. *Journal of Economic Theory*, 71 : 324–348.
- RAY, I. et WILLIAMS, J. (1999). Evaluation of price policy in the presence of water theft. *American Journal of Agricultural Economics*, 81, nov :928–941.
- RINAUDO, J.D. (2000). *Rentes, corruption et lobbying politique. Obstacles aux réformes dans le secteur irrigué au Pakistan*. Thèse, Clermont- Ferrand.
- ROMAGNY, B. (1996). *Développement durable, bioéconomie et ressources renouvelables. Reflexion sur les modes d'appropriation et de gestion de ces ressources*. Thèse, Université de Sophia-Antipolis.
- ROSEGRANT, M. et BINSWANGER, H. (1994). Markets in tradable water rights : Potential for efficiency gains in developing country water resource allocation. *World Development*, 22, 11 :1613–1626.
- ROSEGRANT, M. et MEINZEN-DICK, R. (1996). Water resources in the Asia-Pacific region : Managing scarcity. *Asian-Pacific Economic Literature*, Vol 10, 2.
- ROUZERE, H. (2001). Les Agences de Bassin en Afrique du Sud. Composantes de la négociation dans le cas de l'Oliphants River. Mémoire de fin d'études de l'ENGEES, Cemagref Montpellier.
- SALIBA, B. et BUSH, D. (1987). *Water markets in theory and practice*. Westview Press, Boulder, Colorado.

- SALANIE, B. (1994). *Théorie des contrats* Ed. Economica, Paris.
- SAMPATH, R. (1990). Measures of inequity for distribution analysis of large public surface irrigation systems : a welfare theoretic approach. In *Social, Economic and Institutional Issues in Third World Irrigation Management*, Studies in Water Policy and Management, 15, pages 75–108. Westview Press, Oxford.
- SCET-TUNISIE (2000). Projet d'économie d'eau dans les périmètres irrigués de petite et moyenne hydraulique au Centre Ouest de la Tunisie. Gouvernorat de Kairouan. Etude de faisabilité du périmètre de Bled Abida. CRDA de Kairouan.
- SCHIMDT, C. (2001). *La théorie des jeux. Essai d'interprétation*. Presses Universitaires de France.
- SCHLAGER, E., BLOMQUIST, W. et YAN TANG, S. (1994). Mobile flows, storage and self organized institutions for governing Common Pool Resources. *Land Economics*, 70 (3).
- SCHOTT, S. (2001). A partnership solution to the Tragedy of the Commons. In *4ème Journées d'économie de l'environnement de Toulouse*.
- SCOTT, A. et COUSTALIN, G. (1995). The evolution of water rights. *Natural Resources Journal*, Vol 35, fall 1995.
- SEABRIGHT, P. (1996). Accountability and decentralization in government : an incomplete contract model. *European Economic Review*, Vol 40.
- SEKI, E. et PLATTEAU, J. (1998). Coordination and pooling arrangement in Japanese coastal fisheries. Working Paper, CRED, Université de Namur.
- SHUBIK, M. (1982). *Théorie des jeux et sciences sociales*. Economica édition.
- SHUPE, S., WEATHERFORD, G. et CHECCHIO, E. (1989). Western water rights : The era of reallocation. *Natural Resources Journal*, 29, spring.
- SIEDENTOP, L. (2000). *Democracy in Europe*. Ed Penguin.
- SIMON, B. et ANDERSON, D. (1990). Water auction as an allocation mechanism in Victoria, Australia. *Water Resources Bulletin*, 26(3) :387–395.
- SIXT, P. (2001). La gestion volumétrique de l'eau d'irrigation en France : inventaire et analyse descriptive d'expériences en cours. CEMAGREF, mémoire de fin de DESS.
- SMALL, L. et RIMAL, A. (1996). Effects of alternative water distribution rules on irrigation system performance : a simulation analysis. *Irrigation and Drainage system*, 10 : 25–45.
- CONSEIL Economique et Social (1998). Avis sur l'agriculture face aux risques climatiques.
- STEINER, R. et WALTER, M. (1992). The effect of allocation and scheduling rules on equity and productivity in irrigation systems. *Agricultural Water Management*, 21.
- STROSSER, P. (1997). *Analysing Alternative Policy Instruments for the Irrigation Sector ; an assessment of the potential for water markets in the Chistian Subdivision*. Thèse, University of Wageningen.
- TARDIEU, H. (1999). La valeur de l'eau en agriculture irriguée : une information économique nécessaire pour mieux réguler la gestion de l'eau et des productions agricoles dans un marché ouvert. In *Conférence de la CIID*, Grenade.

- THOYER, S., MORARDET, S., RIO, P., SIMON, L., GOODHUE, R. et RAUSSER, G. (2001). A bargaining model to simulate negotiations between water users. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 4, 2.
- TOWNSEND, R. (1994). Risk and insurance in village India. *Econometrica*, 62, 3.
- TREYER, S. (1999). Politiques de gestion de l'eau en Tunisie, profil-pays pour le Plan Bleu.
- TUNISIEN, M. D. L. (1998). Eau 21, stratégie du secteur de l'eau en Tunisie à long terme (2030).
- VERCAMMEN, J. (2000). Constrained efficient contracts for area yield crop insurance. *American Journal of Agricultural Economics*, nov.
- VERDEIL, D. (1993). Diagnostic agro-économique et hydraulique du périmètre irrigué de la Begona - Mexique. Institut Agronomique Méditerranéen - Montpellier.
- VERMILLON, D. et GARCES-RESTROPO, C. (1996). Results of management turnover in two irrigation districts in Colombia. Research report, IIMI.
- SCIENCES et Vie (2000). Menaces sur l'eau. comment éviter la crise mondiale. 211, hors série.
- WADE, R. (1990). On the "technical" causes of irrigation behavior, or why irrigators keep interfering in the main system. In *Social, economic and institutional Issues in Third World Irrigation Management*, pages 175–194. Westview Press, Oxford.
- WALKER, J., GARDNER, R., HERR, A. et OSTROM, E. (2000). Collective choice in the commons : experimental results on proposed allocation rules and votes. *Economic Journal*, 110, jan :212–234.
- WEIBULL, J. (1995). *Evolutionary Game Theory*. MIT.
- WEIBULL, J. (1999). What have we learned from Evolutionary Game Theory so far ? In *Cours au THEMA, Nanterre, juin 1999*.
- WEISSING, F. et OSTROM, E. (1991). Irrigation institutions and the games irrigators play : Rule enforcement without guards. In *Game equilibrium Models II : Methods, Morals and Markets*. Berlin, Springer-Verlag. Ed Reinhard Selten.
- WEISSING, F. et OSTROM, E. (1993). Irrigation institutions and the games irrigators play : rule enforcement gouvernement and farmer-managend systems. In SCHARPF, F.E., éditeur, *Games in Hierarchies and Networks : Analytical and Empirical Approaches to the Study of Governance Institutions*.
- WILSON, P. et THOMSON, G. (1993). Common property and uncertainty : compensating coalitions by Mexico's pastoral ejidarios. *Economic Development and Cultural Change*, 41 (2).
- WINPENNY, J. (1997). Demand management for efficient and equitable use. In *ICID Conference*, pages 296–303, Oxford. E and FN SPON.
- WITTFOGEL, G. (1956). *Le despotisme asiatique, livre de la thèse (1933)*.
- YODER, R. (1994). Locally managed irrigation systems : essential tasks and implications for assistance, management transfer and turnover programs. Rapport technique, IWMI.
- YOSKOWITZ, D. (1999). Spot markets for water along the Texas Rio Grande : Opportunities for water management. *Natural Resources Journal*, Vol 39, spring 1999.

- YOUNG, E. et WESTCOTT, P. (2000). How decoupled is U.S. agricultural support for major crops? *American Journal of Agricultural Economics*, 82 (3) : 762–767.
- ZANKER, S. (1999). Modélisation et gestion de la demande agricole en eau dans la Drôme. Cemagref, stage de fin d'études de l'ENGREF.
- ZIMMERMAN, F. et CARTER, M. (1999). A dynamic option value for institutional change : Marketable property rights in the Sahel. *American Journal of Agricultural Economics*, 81, mai : 467–478.

Liste des tableaux

1.1	forme générale des jeux à deux joueurs	46
2.1	les types d'agriculteurs à El Melalsa, selon les décisions d'assolement à l'équilibre pour la règle <i>ex post</i> avec durée individuelle libre	94
2.2	résultats principaux pour les différentes allocations, à El Melalsa	107
2.3	principaux coefficients utilisés pour la simulation sur le GIC d'El Melalsa	110
4.1	différentes règles possibles d'allocation de l'eau sur une rivière non maîtrisée	176
5.1	principales origines de l'existence de règles <i>ex post</i>	188
6.1	différentes règles possibles pour diminuer la demande de pointe sur une rivière dont le débit n'est pas maîtrisé	205

Table des figures

1	les étapes de définition et de mise en œuvre des règles de gestion de l'eau	13
2	pertinence des différentes mesures de l'allocation en l'eau en fonction de la variabilité de la ressource et du coût d'acquisition de l'information .	17
3	demande en eau insatisfaite du fait de la non continuité de la fonction de coût (CM coût moyen ; Cm coût marginal ; D(p) demande en eau en fonction du prix)	18
4	demande en eau insatisfaite du fait d'une impossibilité politique d'augmenter la ressource	19
5	demande en eau insatisfaite du fait de l'existence d'un prix considéré comme plafond par les usagers	19
6	une typologie des règles d'allocation de l'eau	23
7	les éventuelles interdépendances créées par les règles d'allocation de l'eau	24
8	situation du bassin du Merguelli	27
9	position des trois périmètres étudiés	28
10	le réseau d'El Melalsa	29
11	le réseau de Bled Abida	31
12	le réseau de Souaidia	32
13	le bassin de l'Adour	34
14	départements et rivières principales du bassin de l'Adour	34
1.1	typologie des biens	39
1.2	type du bien collectif en fonction des paramètres de la fonction de production dans Bardhan et al. (2000)	44
1.3	différents types de jeu à deux joueurs	46
1.4	l'effet sur le revenu total tiré d'une RBC en fonction de la relation entre revenu individuel et paramètre d'hétérogénéité	48
1.5	différents modèles d'impact de l'hétérogénéité suivant la forme de la fonction d'hétérogénéité (B., P. pour Baland et Plateau, D. pour Dayton-Johnson, Ba. pour Bardhan)	50
1.6	courbes de réponse et solutions à l'équilibre dans un jeu à deux joueurs pouvant être altruistes (d'après Bester et Güth, 1998)	53
1.7	les différents niveaux d'information mobilisés par un joueur (d'après Cardenas et Ostrom, 2001)	55
1.8	les deux principaux arbitrages étudiés	65
1.9	le choix d'un niveau d'interdépendance	66
1.10	volume optimal par hectare pour un agriculteur seul	68
1.11	fonctions de réaction	72

2.1	lieu des allocations avec l'allocation optimale et le mécanisme de révélation	79
2.2	surfaces mises en culture pour $\alpha = 0.05$ pour les différentes allocations .	85
2.3	profit individuel (avec les éventuelles taxes redistribuées de façon égales) pour $\alpha = 0.05$	85
2.4	ratio entre la valorisation totale pour une règle donnée et la valorisation pour l'allocation optimale	85
2.5	dilemme équité-valorisation de l'eau pour un groupe homogène ($\alpha = 0.001$)	88
2.6	dilemme équité-valorisation de l'eau pour un groupe hétérogène ($\alpha = 0.3$)	88
2.7	différentes étapes de simulation pour atteindre l'assolement à l'équilibre	93
2.8	pour chaque type d'agriculteur, (a) la part du melon sur la surface totale cultivable, (b) le profit à l'hectare issu des cultures du périmètre, pour les différentes allocations	95
2.9	mécanisme de révélation	104
2.10	taxe associée au mécanisme de révélation	104
2.11	simulation de l'évolution de la longueur du tour d'eau pour la règle de durée individuelle d'irrigation libre avec assolement et pluie de l'année 98-99 pour El Melalsa	111
3.1	choix de surface d'un agriculteur avec deux volumes possibles	118
3.2	revenu individuel en fonction de la valeur créée collectivement, dans le cas d'un partage linéaire du risque et d'un revenu moyen constant . . .	120
3.3	les différentes règles d'allocation étudiées (en grisé : allocations existantes)	123
3.4	évolution des profits des agriculteurs en fonction du volume globalement disponible avec une allocation <i>ex ante</i> complétée ou non d'un marché. .	125
3.5	évolution de la surface collective en fonction de la tolérance collective avec allocation ou marché de type <i>ex ante</i> ou <i>ex post</i> et un prix de l'eau faible	129
3.6	évolution de la surface individuelle en fonction de la tolérance individuelle avec allocation ou marché de type <i>ex ante</i> ou <i>ex post</i> , prix de l'eau faible	130
3.7	critères de partage de risque et de valorisation optimale (noir = optimal, gris = effet positif)	136
3.8	critère de diminution de la variabilité inter-annuelle des revenus	137
3.9	équité de la règle d'allocation (noir pour équité optimale, blanc pour équité possible)	137
3.10	schéma de la répartition théorique du risque entre usages sur l'Adour en période d'étiage	138
3.11	schéma de la répartition réelle du risque entre usages sur l'Adour en période d'étiage	139
3.12	valorisation totale à El Melalsa suivant l'assolement collectif total, la règle d'allocation et la pluviométrie	141
3.13	valorisation totale à Souaidia suivant l'assolement collectif total et la pluviométrie	142
3.14	pluie annuelle dans la région d'El Melalsa	152
3.15	pluie mensuelle dans la région d'El Melalsa	152
3.16	pluie annuelle dans la région de Souaidia	152

4.1	le choix d'un niveau d'agrégation d'information	158
4.2	les différents niveaux de restriction sur l'Adour gersois	159
4.3	les différents niveaux de restriction sur la partie Pyrénées-Atlantiques du Gabas	160
4.4	débit fictif continu en fonction de la surface irriguée sur le Gabas	161
4.5	débit fictif continu en fonction de la surface irriguée sur l'Adour	161
4.6	débits à l'entrée et à la sortie de l'Adour gersois à l'été 1999 (source DDAF 32)	163
4.7	débits à l'entrée et à la sortie de l'Adour gersois en août 1999 (source DDAF 32)	163
4.8	exemple de niveau de restriction de prélèvement en fonction du prélèvement collectif	165
4.9	description générale du jeu	165
4.10	rapport ETR/ETM en fonction du réservoir d'eau dans le sol	166
4.11	valeur W en fonction du niveau du réservoir sol	166
4.12	choix d'irrigation pour un agriculteur	167
4.13	débits naturel et après prélèvement	168
4.14	niveau d'irrigation	169
4.15	évolution du réservoir sol	169
4.16	niveau d'interdiction de prélèvement	169
4.17	impact de l'hétérogénéité	170
4.18	valeurs associées à chaque niveau du réservoir racinaire R	177
4.19	valeurs associées pour un agriculteur à un état de la Nature au pas de temps 4 défini par la R et le niveau courant de la restriction	177
5.1	classification des différentes règles d'allocation possibles avec des cas d'application	181
5.2	différentes règles d'allocation et de taxation en fonction de la rigidité de la contrainte en eau (d'après Montginoul, 1998)	183
5.3	classification des différentes structures de décision possibles avec des cas d'application	189
6.1	valorisation totale de l'eau sur le périmètre d'El Melalsa selon l'assolement, l'état du réseau, la règle de répartition et la pluviométrie	200
A.1	pertes sur le réseau d'El Melalsa en 1999	237
A.2	périodes de présence pour les trois principales cultures à El Mesalsa	238
A.3	coefficients culturels (Kc) des principales cultures à El Melalsa	239
A.4	pluie réelle et statistique sur Chebika, une station météorologique proche d'El Melalsa	241
A.5	fonctionnement du forage d'El Melalsa pendant l'année 98-99	241
A.6	répartition géographique du rapport total ETR/ETM du blé à El Melalsa en 98-99 (l'étoile indique que l'agriculteur a irrigué son blé au moins une fois).	242
A.7	variation du rapport ETR/ETM pour le blé pour quelques champs caractéristiques à El Melalsa	243
A.8	répartition géographique du rapport total ETR/ETM du melon à El Melalsa en 98-99	244

A.9	variation du rapport ETR/ETM pour le melon pour quelques champs caractéristiques à El Melalsa	245
A.10	estimation des pertes dues au réseau et aux séguias en terre à Bled Abida	247
A.11	coefficients culturaux des principales cultures utilisées à Bled Abida . .	248
A.12	cultures faites à Bled Abida pendant l'hiver 98-99	249
A.13	rendement réalisé pour le blé à Bled Abida pendant l'hiver 98-99	249
A.14	cultures faites à Bled Abida pendant l'été 99	250
A.15	évolution des cultures à Bled Abida entre 98-99 et 99-2000	251
A.16	fonctionnement du forage de Bled Abida pendant l'année 98-99	251
A.17	surfaces mises en culture à Souaidia pendant l'année 98-99	253
A.18	coefficients culturaux Kc des deux principales cultures de Souaidia . .	253
A.19	carte des stress subis par le piment à l'été 99 à Souaidia	254
A.20	chronique d'utilisation du forage à Souaidia pendant l'année 98-99 . . .	254

Abréviations

AIC : Association d'Intérêt Collectif
ASA : Association Syndicale Autorisée
CACG : Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne
CRDA : Commissariat Régional de Développement Agricole
CTE : Contrat Territorial d'Exploitation
CUMA : Coopérative d'Utilisation de Matériel Agricole
DDAF : Direction Départementale de l'Agriculture et de la Forêt
DCR : Débit de Crise
DOE : Débit Objectif d'Etiage
DT : Dinar Tunisien (environ 5 FF en 2001)
ETP : Evapotranspiration Potentielle
ETR : Evapotranspiration Réelle
GIC : Groupement d'Intérêt Collective (nouveau nom des AIC depuis 1999)
INAT : Institut National Agronomique de Tunis
IRD : Institut de Recherche pour le Développement (ex ORSTOM)
IWMI : International Water Management Institute (auparavant International Irrigation Management Institute)
MERGUSIE : Projet de Recherche sur les Usages et la Ressource dans le bassin versant du Merguellil (Tunisie centrale)
OMIVAK : Office de Mise en Valeur de la Région de Kairouan
PGE : Plan de Gestion des Etiages
PPI : Périmètre Public Irrigué
RBC : Ressource en Bien Commun
SAGE : Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux
SDAGE : Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux
SLEEPI : SimuLation Economique à l'Echelle des Périmètres Irrigués
SONEDE : Société Nationale d'Exploitation et de Distribution des Eaux
STEG : Société Tunisienne d'Electricité et de Gaz (la "*maison de lumière*" en arabe dialectal)
UTH : Unité de Travail Humain
vNM : von Neumann et Morgenstern

Glossaire

- Aiguadier** : personne en charge de la répartition de l'eau sur un périmètre irrigué. Dans les petits périmètres irrigués en Tunisie, l'aiguadier est aussi en charge du fonctionnement de la pompe.
- ASA.** L'Association Syndicale Autorisée est le statut juridique le plus fréquent des périmètres irrigués en France. Les ASA sont des établissements publics.
- Corette** : plante maraîchère dont les feuilles ont un goût proche de l'oseille, en arabe *mroukhia*.
- ETP.** L'EvapoTranspiration Potentielle est la quantité d'eau évaporée par un gazon suffisamment arrosé, dans des conditions standardisées de vent. Elle est mesurée en mm par unité de surface.
- ETM.** L'EvapoTranspiration Maximale est la quantité d'eau évaporée par l'ensemble plante-sol pour une plante donnée à un stade précis de son développement. Elle est définie comme étant égale à ETP multipliée par un coefficient cultural dépendant du type de plante et de son stade de développement.
- ETR.** L'EvapoTranspiration Réelle est la quantité d'eau réellement évaporée par le système sol-plante compte-tenu d'un éventuel déficit en eau. Elle peut être estimée à partir du déficit en eau dans le sol.
- Externalité.** Situation où les décisions de consommation ou de production d'un agent affectent directement la satisfaction ou le profit d'autres agents, sans que le marché évalue et fasse payer ou rétribue l'agent pour cette interaction (Picard, 1994). "Internaliser les externalités" consiste alors à faire en sorte que l'agent prenne en compte les externalités dont il est à l'origine lorsqu'il décide d'une action.
- Fellah** : agriculteur maghrébin.
- Fertigation** : apport des fertilisants par le biais de leur mélange dans l'eau d'irrigation.
- Limnimètre** : échelle mesurant les hauteurs d'eau dans une rivière et qui permet, grâce à une courbe de tarage, d'en déduire le débit de la rivière.
- Main d'eau.** Sur un périmètre irrigué, le débit du canal principal est souvent fractionné pour remplir plusieurs canaux secondaires simultanément. Chaque part de ce débit, ou main d'eau, va alimenter un secteur donné du périmètre.
- MISE** : la Mission InterService de l'Eau a été créée dans chaque département pour coordonner l'action des différents services de l'Etat concernés par l'eau : DDE, DRIRE, DDASS, DDAF. C'est souvent cette dernière qui en assure la gestion dans les départements ruraux.

Nash (équilibre de). Un équilibre de Nash est un ensemble d'actions décidées par chacun des joueurs tel que, cet ensemble étant donné, aucun joueur n'a intérêt *unilatéralement* à modifier son choix. De façon plus formalisée, il s'agit d'un profil de stratégies $(\sigma_1^*, \dots, \sigma_n^*)$ tel que chaque σ_i^* est une meilleure réponse aux stratégies d'équilibre des autres joueurs σ_{-i}^* (Salanié, 1994) :

$$\forall i, \sigma_i^* \in \arg \max_{\sigma_i} u_i(\sigma_i, \sigma_{-i}^*)$$

Un équilibre de Nash est dit en *stratégies dominantes* si la meilleure réponse d'un agent ne dépend pas de celles des autres agents : il existe alors un unique équilibre de Nash associé au jeu.

Neste. Le système Neste utilise un canal de dérivation des eaux de la Neste (un affluent de la Garonne) pour réalimenter les rivières du plateau de Lannemezan. Le canal, complété par quelques retenues, permet l'existence de l'irrigation et la garantie d'un débit minimal de gestion sur ces rivières. Il est géré par la Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne (CACG).

Omda : chef de l'*imada*, la plus petite division administrative rurale en Tunisie.

Oued : terme générique désignant une rivière au Maghreb. Dans la quasi-totalité des cas, ces rivières ne sont en eau qu'une faible partie de l'année.

Pompiste : l'aiguadier, celui qui est à la fois responsable du fonctionnement du forage et de la distribution de l'eau.

Révélation (mécanisme de). Un mécanisme de révélation est un processus d'allocation lorsque le Centre ne connaît pas les caractéristiques individuelles des agents. Ce processus comporte trois étapes. D'abord, le Centre annonce ce que chaque agent va recevoir en fonction de la caractéristique annoncée. Ensuite, les agents annoncent au Centre leur caractéristique (ce mécanisme est alors *direct* dans le sens où les messages ne contiennent que les caractéristiques des agents). Enfin, le Gestionnaire procède à l'allocation en fonction des annonces faites. Par ailleurs, un mécanisme de révélation est par définition *révélateur*, c'est-à-dire que l'annonce des vraies caractéristiques est un équilibre de Nash (qu'on pourra éventuellement vouloir être en stratégies dominantes).

Séguia : petit canal d'irrigation à ciel ouvert. Ce terme désigne à la fois les raies au sol pour faire amener l'eau du réseau à la parcelle et les conduites en béton des réseaux des années 60.

Shapley (valeur de). La valeur de Shapley permet de répartir le gain associé à la grande coalition entre tous les agents en fonction de leur influence potentielle parmi toutes les coalitions possibles. Soit $v(K)$ la fonction caractéristique du jeu, i.e. le gain maximal que la coalition K peut atteindre par le biais d'une coopération entre les agents. Alors :

$$\phi_i(v) = \sum_{K \subset N} [v(K) - v(K \setminus \{i\})] \frac{(k-1)!(n-k)!}{n!}$$

où $k = \text{card}\{K\}$.

Tabia : banquette de terre parallèle aux lignes de niveau qui permet de briser le ruissellement et donc de favoriser l'infiltration des eaux de pluie.

Tour d'eau : ordre défini pour l'irrigation entre les différents agriculteurs utilisant la même main d'eau.

Warabandi : système de répartition du tour d'eau mis en place à l'époque de la construction des grands périmètres irrigués par les Britanniques à la fin du XIX^{ème} siècle dans les Indes. A l'échelle d'un tertiaire, le tour d'eau est compté en heures, proportionnelles à la surface possédée. Il peut être *pucca*, c'est-à-dire rigide, ou *kutcha*, flexible, négociable entre les agriculteurs au cas par cas.

Index

- équité, 17, 23, 69–71, 74, 75, 77, 87, 121, 137, 184, 194, 203
- Adour, 12, 15, 32, 69, 90, 122, 123, 127, 137–139, 153, 170, 172
- Arros, 15, 33, 113, 154, 156, 159
- gersois, 32, 33, 159–176, 203, 256
- Autriche, 133
- Bled Abida, 30, 82, 90, 96, 131, 144, 201, 246–251
- Californie, 60, 125, 126, 130, 144
- Canada, 114, 134
- Charente, 15, 90, 158, 172, 173, 193
- Chili, 21, 124, 125, 130, 176
- Colombie, 50, 52, 77, 96
- Débit de Crise, 138
- Débit Objectif d'Etiage, 32, 138, 139
- décentralisation, 25, 191, 194, 196, 197, 201
- Drôme, 155, 193
- El Melalsa, 23, 29, 90, 118, 140, 152, 188, 200, 201, 204, 237–244, 255
- Espagne, 21, 127
- Etats-Unis, 21, 60, 113, 114, 123–125, 130, 132–135, 139, 193–195
- Ethiopie, 130
- Gabas, 15, 33, 35, 159–176, 205, 256
- Inde, 14, 23, 49, 76, 83, 114, 123, 186, 187, 191, 194, 208
- Indonésie, 82, 181
- mécanisme de révélation, 66, 82
- marché, 21, 119, 121, 122, 124, 125, 151
- Mexique, 55, 57, 95, 114, 182
- mutualisation des revenus, 55, 83
- Nash, 21, 38, 42–45, 50, 52, 58, 63, 91, 99, 121, 138, 158, 167, 168, 177, 178
- Neste, 15, 139, 154, 186
- oasis, 21, 22, 26, 124, 127
- Ostrom, 21, 38, 39, 45–47, 50, 54, 55, 58–61, 96
- Pakistan, 14, 18, 22, 83, 87, 123, 191, 194, 195, 208
- partage du risque, 113, 115, 116, 130, 144
- Philippines, 23, 115, 181, 194
- Plan de Gestion des Etiages, 33, 139, 159, 196
- Portugal, 114, 133
- principe de taxation, 79, 103
- rente, 22, 76, 79, 137, 191, 195
- Souaidia, 31, 96, 118, 131, 133, 140, 142, 144, 202, 252–255
- Tanzanie, 23, 95
- Tragédie des Communs, 40, 50, 56, 58, 126, 128, 130, 185
- warabandi, 22, 95, 113, 118, 123, 127, 194

Annexes

Annexe A

Description des trois périmètres irrigués tunisiens

A.1 Méthode générale d'analyse

Dans le cadre du projet MERGUSIE, une méthode d'analyse des périmètres a été mise en place au printemps 2000. Cette analyse a été effectuée de février à juin 2000 par une équipe d'étudiants. Sophie Lardilleux, en stage de fin d'étude de l'ENGEES, a réalisé un bilan hydrique et un diagnostic sur une année complète et à l'échelle du champ pour ces trois associations. Olfa Souki, en stage de fin d'étude de l'Institut agronomique de Moghrane, a effectué des enquêtes détaillées de façon à approfondir les stratégies des irrigants et surtout de manière à évaluer le fonctionnement social du GIC. Até Koukou Tchamba, en fin d'étude à l'INAT, a utilisé la programmation mathématique pour simuler les choix des agriculteurs face au manque de disponibilité en eau et modéliser l'impact des politiques de subventions sur le passage des agriculteurs à des techniques d'aspersion ou de goutte-à-goutte. Enfin, le travail a été complété par d'autres étudiants (Mohamed Keffi, Anne Robert) et des chercheurs du projet MERGUSIE.

La méthode générale de l'analyse, détaillée dans (Faÿsse, 2000), est brièvement rappelée ici.

Le constat initial était que, **lors des études pour la rénovation des périmètres, le partage de l'eau était souvent négligé : les avantages de la rénovation technique ne sont pas comparés aux gains permis par une meilleure distribution de l'eau.**

Le GIC étant considéré comme une *unité collective de production, de distribution et de partage de l'eau*, les deux questions suivantes ont servi de fil conducteur pour l'étude :

- quelle est l'efficacité actuelle des gestions technique et sociale de l'eau ?
- quel est le potentiel de gain dans un changement des règles de partage et/ou des infrastructures ?

Les réponses pourraient permettre d'ordonner les priorités de réhabilitation, entre fonctionnement social et technique.

Une étude semblable a déjà été menée par Gilot (1994), sur le périmètre d'Urcuqui en Equateur. A partir d'un bilan hydrique par parcelle, Gilot ordonne les différents facteurs de dysfonctionnement possibles, individuels puis collectifs. Puis il simule l'annulation de ces facteurs dans l'ordre choisi. Il obtient, pour chaque stress hydrique sur un champ

donné, l'ensemble quantifié des facteurs responsables du déficit en eau. Gilot étudie enfin l'impact d'un changement d'assolement ou d'une restructuration complète des droits d'eau.

En Tunisie, l'analyse des périmètres irrigués fut menée simultanément à trois niveaux :

- a) le bilan hydrique au niveau de la parcelle ;
- b) l'analyse économique au niveau de l'exploitation agricole (il faut alors prendre en compte aussi les parcelles situées hors du périmètre) ;
- c) l'étude du réseau et du fonctionnement social, à l'échelle du périmètre irrigué entier.

A.1.1 A) Diagnostic du fonctionnement réel

a) Bilan hydrique pour tous les champs du périmètre irrigué sur une année

Le bilan hydrique au pas de temps journalier est simulé avec un modèle de réservoir distinguant l'évaporation de la transpiration, écrit à partir du logiciel SARRA développé par le CIRAD. Pour pouvoir traiter simultanément une trentaine de champs, les équations sont importées dans un tableur Excel nommé Bilhy. Pour les données d'irrigation au champ, une enquête exhaustive fut réalisée auprès de tous les agriculteurs, concernant les données principales de leur exploitation, les surfaces possédées dans et hors du périmètre, l'assolement réalisé pendant la période étudiée et l'origine de l'eau d'irrigation. Par ailleurs, le cahier de l'aiguadier a permis de connaître le volume ou le temps payé à une date donnée par un agriculteur. Lorsqu'un agriculteur possède plusieurs parcelles simultanément en culture et que le tour d'eau ne permet pas de déterminer quel champ fut irrigué, l'eau a été répartie entre les champs de l'agriculteur proportionnellement aux surfaces pondérées par les coefficients culturaux K_c .

L'ensemble de ces données permet d'établir, pour chaque champ du périmètre, les quantités d'eau apportées et donc d'en déduire le stress hydrique subi par la plante puis finalement l'impact de ce stress sur le rendement.

b) Analyse du fonctionnement social du périmètre

A partir des enquêtes exhaustives effectuées, une typologie a été construite d'abord en fonction du mode d'accès à l'eau (GIC ou puits en périmètre, puits hors du périmètre), puis en fonction de la taille de l'exploitation, à la fois à l'intérieur et hors du périmètre. Ensuite, **une enquête approfondie est réalisée auprès d'une ou deux personnes représentantes de chacun des types, ainsi qu'auprès des trois responsables du GIC : le président, le trésorier et l'aiguadier.** Cette enquête permet de discuter avec chaque agriculteur des relations qu'il entretient avec le GIC et de sa perception du fonctionnement de l'ensemble du GIC.

c) Analyse économique

L'enquête approfondie est aussi l'occasion de faire un bilan économique précis de l'exploitation pendant l'année considérée : les pratiques culturales, les charges par cultures et les rendements obtenus. Une modélisation par programmation linéaire est calée sur les données par type.

A.1.2 B) Simulation de scénarios

La description d'un périmètre irrigué est ici résumée selon trois caractéristiques principales : le réseau, les règles de répartition de l'eau et les assolements choisis. Le tableur

Bilhy permet de simuler la valorisation totale obtenue sur l'ensemble du périmètre à partir de la donnée (1) de l'état du réseau, (2) de la règle d'allocation, (3) de l'assolement global sur le périmètre. Cette valorisation de l'eau est calculée à partir d'une fonction de rendement fondée sur les coefficients Ky de sensibilité au stress hydrique. On teste différents triplets de paramètres : réseau actuel ou rénové, règle d'allocation de type *ex ante* ou *ex post*, et un assolement global plus ou moins important.

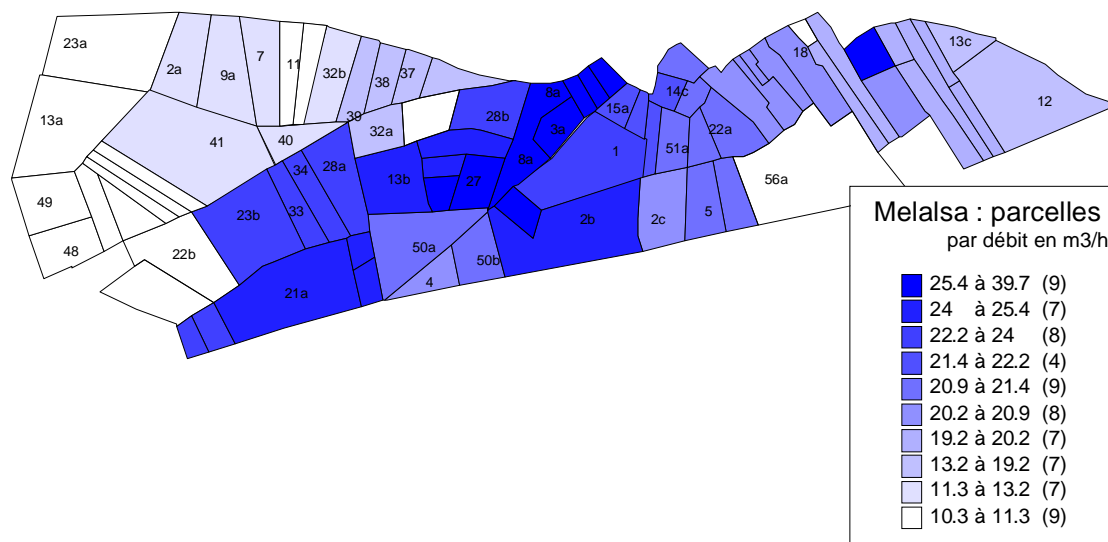


FIG. A.1 – pertes sur le réseau d’El Melalsa en 1999

A.2 El Melalsa

Le périmètre d’El Melalsa est situé près de la ville de Chébika, à 10 km environ à l’Ouest de Kairouan. La pluviométrie annuelle moyenne est de 270 mm/an, pour une évapotranspiration potentielle totale de 1600 mm/an dont 200 mm/mois pendant l’été. Le périmètre couvre 160 ha cultivés par 54 exploitants.

L’Association d’Irrigants (AIC) s’est constituée dès la création du réseau en 1994. En juillet 98, le président, alors directeur de l’école, n’est pas réélu lors de l’Assemblée Générale car il avait utilisé les fonds de l’AIC pour faire construire un bureau dans l’école pour ses propres besoins. Il est alors remplacé par un des agriculteurs. Cependant, les arbitrages que le nouveau président a effectués avec le trésorier pour la distribution de l’eau ont causé de vives tensions : en septembre 2000, cet agriculteur est lui aussi remplacé, par un autre directeur de l’école, qui n’est pas un agriculteur.

A.2.1 Caractéristiques techniques du périmètre

Le forage du périmètre pompe à 65 m de profondeur et délivre un débit moyen de l’ordre de 24 l/s. Plus précisément, “le forage est directement connecté au réseau basse pression, ce qui signifie que le débit d’exhaure de la pompe varie selon la longueur du réseau de distribution (pertes de charge). Les mesures réalisées à l’aide d’un débitmètre à ultrasons montrent que le débit minimal de la pompe est de 20 l/s quand les trois secondaires sont utilisés dans la totalité de leurs longueurs respectives. Lorsque les trois secondaires irriguent des parcelles proches et que donc la longueur du réseau de distribution est minimale, la pompe débite 30 l/s” (Lardilleux, 2000).

Le réseau est en mauvais état, en particulier sur sa partie Ouest. Il n’a plus été entretenu dès l’annonce faite par le CRDA d’une prochaine rénovation du réseau. La figure A.1 montre la répartition géographique de ces pertes.

Enfin, trois puits fonctionnent au sein du périmètre au printemps 2000 : leurs pro-

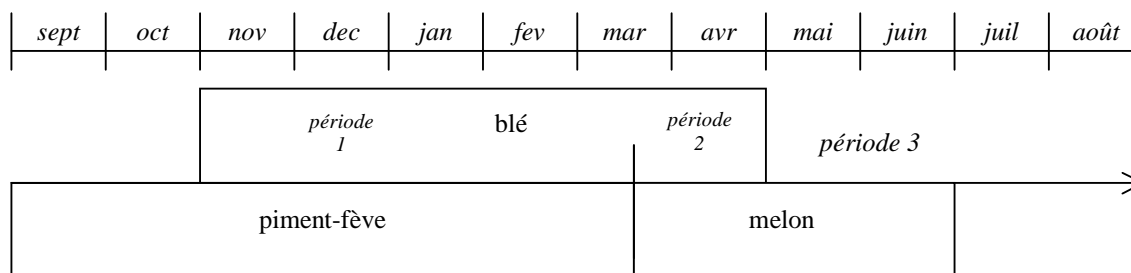


FIG. A.2 – périodes de présence pour les trois principales cultures à El Mesalsa

priétaires n'utilisent que rarement l'eau du GIC (la parcelle 56a, en blanc sur la figure A.1, appartient ainsi à un agriculteur qui y possède un puits).

A.2.2 Finances du GIC

Le prix actuel de l'eau d'irrigation est de 1.2 DT/h pour 10 l/s, soit 33.3 mil/m³¹ si on ne tient pas compte des pertes. Chaque famille paie pour l'eau potable un montant mensuel de 1.2 DT. Le GIC ne pratique pas la subvention de 50% pour l'eau d'irrigation des céréales (voir p. 202). Les principales dépenses effectuées par le GIC sont :

- le salaire de l'aiguadier, 100 DT/mois et 6 DT/nuits de travail ;
- l'électricité, de l'ordre de 600 DT/an (soit 2 mil/m³) ;
- les petites réparations, essentiellement de la soudure sur les conduites usées (au quatrième trimestre 98, le petit entretien a ainsi coûté 156 DT).

La balance du budget est excédentaire ; une partie des fonds est alors utilisée pour de l'aide sociale au sein du village d'El Melalsa.

A.2.3 Pratiques culturales

L'assolement utilisé sur le périmètre est pour l'essentiel fondé sur la succession suivante : le blé de début novembre à fin avril, puis le melon l'année suivante de mi-mars à la fin juin, et enfin l'association piment-fève de début septembre à la mi-mars (figure A.2).

Lorsqu'un sol n'a jamais été cultivé en maraîchage, les agriculteurs sèment systématiquement de la pastèque, qui donnera alors de très bons résultats. Il faut attendre ensuite 5 ans environ pour replanter de la pastèque, en raison de problèmes phytosanitaires. Les agriculteurs plantent donc ensuite une ou deux fois du melon. Il serait envisageable, pour les agriculteurs d'El Melalsa, de ne pas semer en pastèque une parcelle dans le périmètre mais de cultiver en pastèque une terre voisine du périmètre et de l'irriguer avec l'eau du GIC. Ce type d'irrigation est en principe interdit par le CRDA et les agriculteurs d'El Melalsa acceptent cette règle : "on a tous eu cette idée, mais cela ne serait pas tenable".

Dans l'ensemble, les cultures à El Melalsa sont peu diversifiées, ce qui se traduit entre autres par une mauvaise répartition des besoins en eau sur l'ensemble de l'année (fig. A.3).

¹Un dinar tunisien correspond à 1000 millimes.

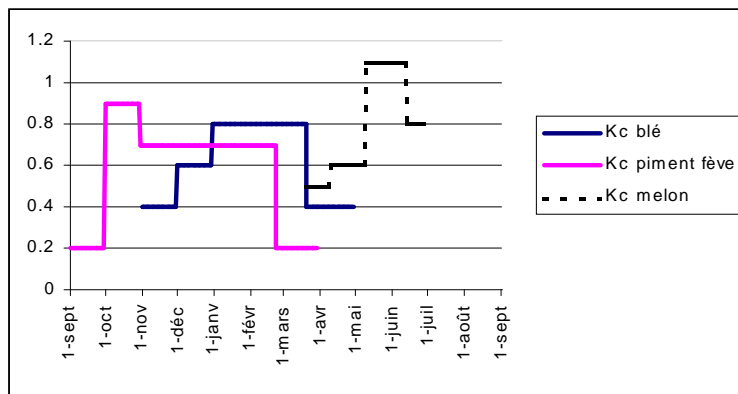


FIG. A.3 – coefficients cultureux (K_c) des principales cultures à El Melalsa

A.2.4 La gestion du tour d'eau

Le tour d'eau est en théorie composé de trois mains d'eau indépendantes, avec, pour chacune d'entre elles, un ordre défini entre les agriculteurs. Cependant, ce tour d'eau est peu utilisé en pratique : l'irrigation se fait à la demande lors des rares périodes où la ressource est suffisante tandis que pendant les périodes de tension sur la ressource, l'arbitrage effectué par l'aiguadier et le trésorier suit rarement le tour d'eau théorique. De plus, lors des semences, il n'y a pas de concertation, par main d'eau, sur les différentes surfaces mises en culture. La période de tension sur la ressource s'étend d'avril à août et notamment en début de campagne de printemps, début avril, car les céréales ont besoin d'une dernière irrigation pendant que débute la campagne d'irrigation du maraîchage.

La pompe fonctionne pendant 9 heures par jour pendant l'hiver et 18 h pendant l'été. Une convention avec la compagnie nationale de production d'électricité (STEG) oblige en effet à ne pas faire fonctionner la pompe pendant la période de consommation de pointe, de 18 heures à minuit. De plus, selon l'agriculteur président du GIC en 2000, cette pause sert aussi à "permettre que la pompe se repose car elle est plus importante que le fellah"*

En début de campagne, depuis plusieurs années, le président et le trésorier vont voir les agriculteurs pour les inciter à ne pas mettre en culture plus d'un hectare de melon...incitation non suivie par certains des dirigeants eux-mêmes au printemps 99!

Les agriculteurs situés en bout de la ligne qui irrigue la partie Ouest se plaignent de recevoir peu d'eau, pour plusieurs raisons :

- les pertes du réseau sont importantes (voir fig. A.1) ;
- lorsqu'un agriculteur en bout de réseau sur la ligne Ouest irrigue en même temps qu'un agriculteur plus proche du sondage, sur la ligne Sud par exemple, ce dernier reçoit de l'eau avec une pression et donc un débit supérieurs ;
- les terres à l'Ouest sont légèrement surélevées, par conséquent lorsque la pompe est arrêtée en fin de journée, les agriculteurs proches du réseau profitent de l'eau restée dans les tuyaux.

La gestion de l'eau s'est révélée très conflictuelle ces dernières années. Lors des enquêtes effectuées au printemps 2000, un agriculteur situé à mi-distance du sondage estime que les agriculteurs proches du sondage reçoivent deux tours d'eau pendant

que ceux qui en sont éloignés n'en reçoivent qu'un. Un autre agriculteur situé dans la partie la plus lointaine, à l'Ouest du sondage, confie que l'année précédente il n'a pas pu irriguer sa fève et qu'il a dû attendre trois mois, à la fin de l'hiver 99-2000, pour pouvoir irriguer son blé. De façon générale, les agriculteurs en bout de réseau estiment que l'arbitrage fait par le président et le trésorier est en leur défaveur. Selon eux, le tour d'eau est mal organisé, il existe des discriminations et le GIC ne "s'intéresse pas aux agriculteurs". Enfin, durant l'Assemblée Générale qui a eu lieu en septembre 2000, des agriculteurs se sont plaints que parfois un agriculteur avait des problèmes pour irriguer sa parcelle de 1 ha car "le voisin a lui semé 5 hectare et il irrigue tout". C'est à cause de cette gestion conflictuelle que le président a décidé de créer son propre puits, à l'intérieur du périmètre, pendant l'hiver 99-2000.

A.2.5 Ordre de priorité entre cultures

Au mois d'avril, le blé est considéré comme prioritaire sur la fève : le blé est irrigué le jour tandis que les agriculteurs désirant irriguer la fève doivent le faire de nuit. De même, la pastèque est considérée comme prioritaire sur le melon et un agriculteur en ayant semé peut s'insérer dans le tour d'eau à condition d'irriguer pendant la nuit. Durant le printemps 2000, le surasselement et le manque de pluie débouchèrent sur une situation de crise (voir p. 90). Les agriculteurs se sont rassemblés tous les 15 jours pour décider du tour d'eau. C'est en pratique le trésorier qui a effectué les arbitrages, le président se tenant alors en retrait.

A.2.6 Bilan de la gestion de l'eau pendant l'année 98-99

Un travail d'enquête effectué au printemps 2000 a permis d'obtenir les caractéristiques principales des exploitations, les cultures effectuées sur 2 ans ainsi que, pour une année entière, de septembre 98 à septembre 99, les doses d'irrigation appliquées à tous les champs du périmètre.

La pluie pendant l'année 1998-1999 a été faible : elle peut être considérée dans son ensemble comme une année quinquennale sèche (fig. A.4).²

Le graphe de l'utilisation du forage par décade (fig. A.5) fait apparaître trois périodes de tension.

- La deuxième quinzaine de septembre 1998 correspond aux irrigations pour les semis de blé, de fève et de piment-fève. Cette période de consommation de pointe ne débouche pas pour autant sur une situation de crise car le forage ne fonctionne pas à sa capacité maximale. De plus, les pluies tombées à cette époque laissent présager une année normale.
- De la mi-mars à la mi-avril 1999, le forage fonctionne au maximum de ses capacités, en raison du chevauchement entre les cultures d'hiver et les cultures d'été.
- Entre fin juin et début juillet 1999, le pic de demande en eau du melon provoque aussi une tension importante sur la ressource et la pompe fonctionne 18 heures sur 24.

²Le bilan de la gestion de l'eau à El Melalsa présenté ici est fondé sur le rapport de Lardilleux (2000).

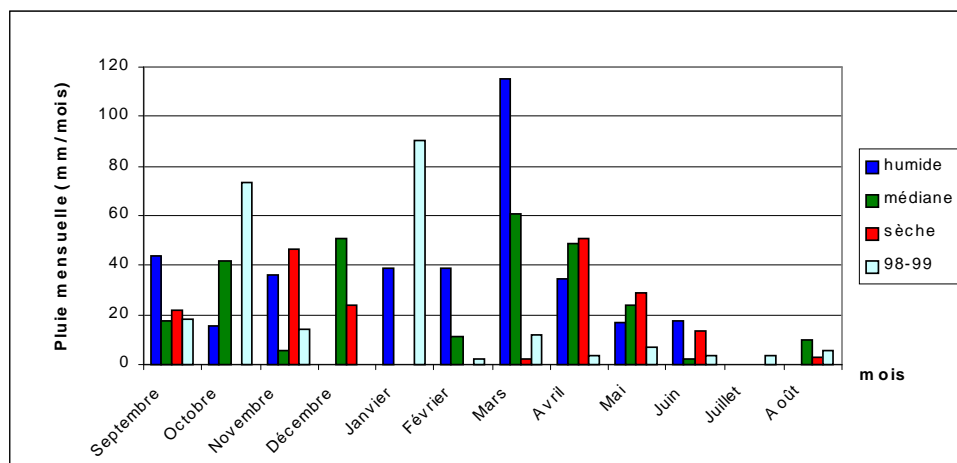


FIG. A.4 – pluie réelle et statistique sur Chebika, une station météorologique proche d'El Melalsa

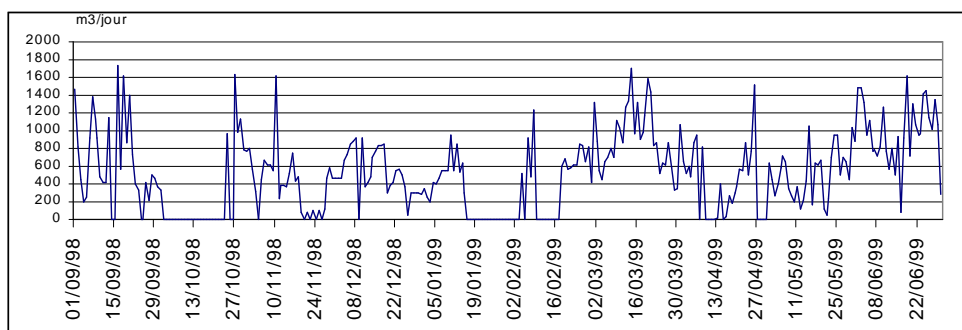


FIG. A.5 – fonctionnement du forage d'El Melalsa pendant l'année 98-99

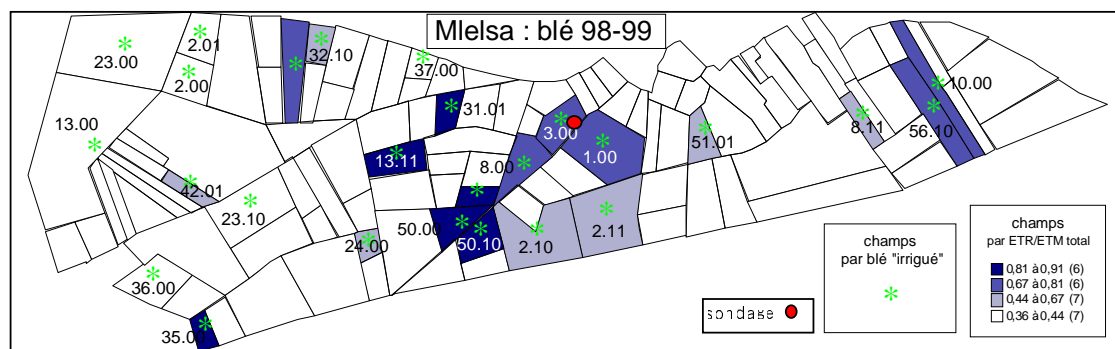


FIG. A.6 – répartition géographique du rapport total ETR/ETM du blé à El Melalsa en 98-99 (l'étoile indique que l'agriculteur a irrigué son blé au moins une fois).

Le blé

Pendant l'hiver 98-99, 38 champs ont été cultivés en blé, soit 61.5 ha (41% de la surface du GIC). En fait, une partie des agriculteurs décide dès le début de cultiver du blé en mode pluvial, i.e. sans irrigation : ces agriculteurs fournissent moins d'intrants et s'en remettent à l'aléa climatique. L'hiver 98-99 s'est avéré peu pluvieux, c'est pourquoi les rendements de ces blés ont été très faibles. Dans l'ensemble, les parcelles ayant donné les meilleurs rendements pour le blé sont situées près du forage (fig. A.6).

En mars, l'irrigation de semis pour le maraîchage est prioritaire sur l'irrigation du blé : celui-ci est alors beaucoup moins bien irrigué (fig. A.7). Cependant, le réseau n'est exploité que 9 heures par jour pendant cette période. **La majorité des agriculteurs estime que, compte tenu des possibilités de rendement du blé et du coût de l'eau, il est plus intéressant de parier sur l'arrivée de pluies et d'utiliser leur trésorerie pour irriguer le melon.**

Le piment- fève

A l'automne 98, 12 champs en fève et 9 champs en fève intercalée avec du piment sont plantés, soit respectivement 12.7 et 8 ha. L'analyse de la culture du piment-fève apporte peu de renseignements. En effet, un certain nombre de parcelles ont été touchées par une maladie pendant le printemps. Les agriculteurs ont alors cessé d'irriguer les parcelles malades. L'étude montre aussi que, de janvier à mars, comme pour le blé, certains agriculteurs ont fait le pari de ne pas irriguer et ont attendu la pluie.

Melon et pastèque

Au printemps 99, 26 champs sont plantés en melon (27.2 ha) et 2 champs en pastèque (0.7 ha). Dans l'ensemble, le surasselement et le peu de pluie durant le printemps ont été à l'origine d'un stress hydrique important. Sur certains champs, ce stress a permis l'apparition d'une maladie : ces champs ont alors été abandonnés (par exemple le champ 52.00, sur le graphique de la figure A.9).

Ce graphique montre aussi que le champ 28.10 est à chaque fois irrigué suffisamment pour remplir le réservoir du sol utilisable par la plante. Néanmoins, à cause de la longueur importante du tour d'eau, le rapport ETR/ETM a pu diminuer jusqu'à atteindre 50% sur ce champ, de façon ponctuelle : **même les parcelles les mieux irriguées ont subi un stress hydrique.**

n° du champ	2.01	42.01	56.1	50.01
représentatif de :	blé en sec	blé le moins bien irrigué	blé irrigué de façon moyenne	blé le mieux irrigué
ph. initiale	83.00%	96.00%	86.00%	77.00%
développement	58.00%	92.00%	100.00%	100.00%
mi-saison	40.00%	47.00%	80.00%	98.00%
récolte	9.00%	11.00%	33.00%	62.00%
total	36	44	67	85

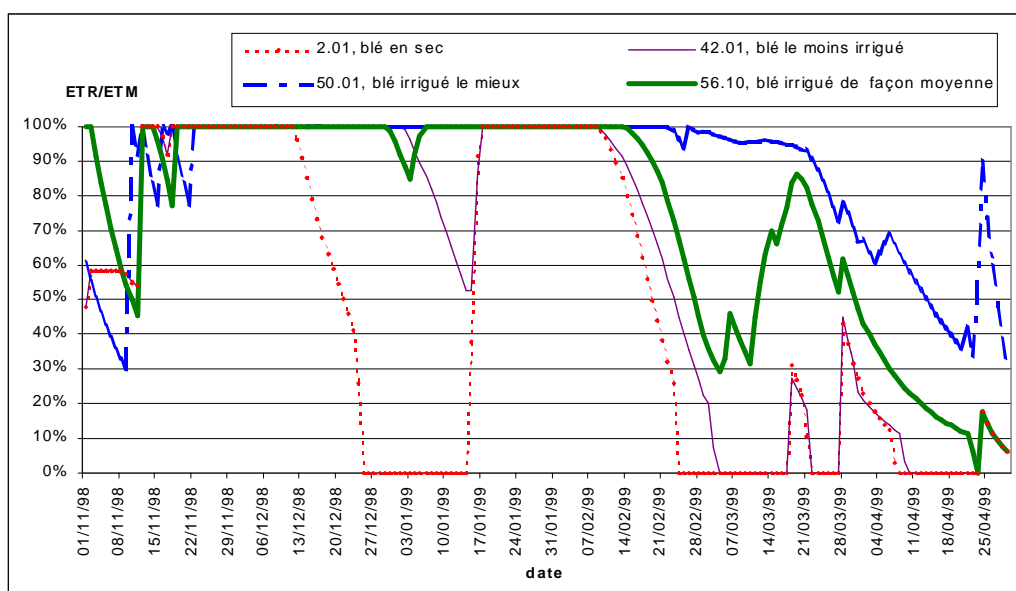


FIG. A.7 – variation du rapport ETR/ETM pour le blé pour quelques champs caractéristiques à El Melalsa

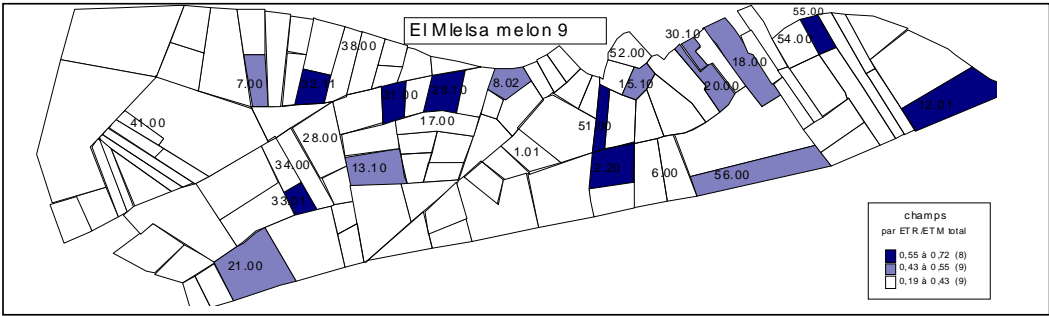


FIG. A.8 – répartition géographique du rapport total ETR/ETM du melon à El Melalsa en 98-99

Le champ 7.00 a été irrigué périodiquement mais les irrigations effectuées ont été insuffisantes pour remplir le réservoir sol pendant le mois de mai. Enfin, à partir de début juin, l’abandon de certains champs de melon a permis de pouvoir mieux irriguer les champs restants.

N° champ	52.00	7.00	28.10
superficie (ha)	0.8	1.2	0.7
représentatif de	champ le moins bien irrigué	champ moyen	champ le mieux irrigué
ini	69%	69%	64%
dev	44%	55%	79%
mi-sais	7%	29%	74%
récolte	3%	65%	64%
Total	19%	45%	72%

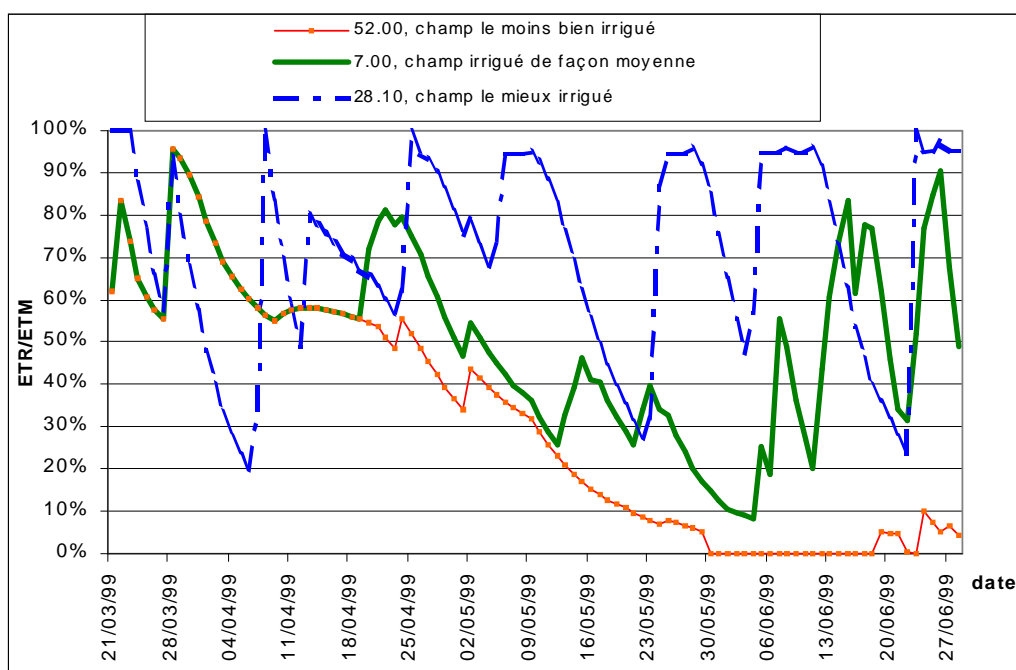


FIG. A.9 – variation du rapport ETR/ETM pour le melon pour quelques champs caractéristiques à El Melalsa

A.3 Bled Abida

Le périmètre irrigué de Bled Abida est situé à 30 km au Sud-Ouest de Kairouan, à 5 km environ d'El Melalsa. La pluviométrie et l'évapotranspiration potentielles sont considérées donc comme identiques à celles existant à El Melalsa.

Le périmètre a été créé en 1969 et, jusqu'en 1976, la pompe fonctionnait au gasoil. Le tour d'eau était alors de 10 jours, soit 200 heures par tour d'eau qui étaient réparties entre les agriculteurs selon les surfaces mises en culture (i.e. une règle de type *ex post*). En 1976, l'électricité est apportée, ce qui permet une augmentation du débit. Les agriculteurs cultivent alors peu de maraîchage, la pression sur la ressource devient faible et le tour d'eau est à la demande, sans limitation des surfaces mises en culture. Les surfaces mises en culture irriguées augmentent progressivement, ce qui conduit à un allongement du tour d'eau, qui atteint 12 jours pendant l'été.

En 1980, face à la tension qui apparaît, l'Office public gérant alors la production agricole régionale, l'OMIVAK, propose de limiter les surfaces mises en culture, de façon à s'assurer que la durée du tour d'eau ne dépasse pas 7 jours. Certains agriculteurs s'y opposent violemment et le projet est abandonné.

L'année suivante, en 1981, l'OMIVAK propose de répartir l'eau en appliquant des normes agronomiques de besoins en eau. Cette méthode se révèle inefficace car les agriculteurs apportent déjà des doses inférieures aux besoins théoriques.

A partir de 1990, les sols deviennent petit-à-petit moins productifs et le réseau se détériore : l'assolement s'oriente alors vers des cultures d'hiver et notamment du fourrage.

En mai 1997 une première AIC est constituée. Elle est dissoute peu après, en août 1998, parce que les responsables n'avaient pas réussi à faire payer l'eau fournie et à équilibrer les comptes de l'association. Une deuxième AIC est ensuite créée et fonctionne correctement jusqu'en 2001.

Derrière le peu d'organisation actuelle des agriculteurs sur ce périmètre se trouve une expérience commune, vieille de 30 ans déjà, d'une gestion du réseau qui a utilisé de nombreuses règles d'allocation différentes.

A.3.1 Caractéristiques techniques du périmètre

Le forage est situé sur la partie droite de la carte (11) et pompe l'eau à 30 m de profondeur. Il devait alimenter un bassin de stockage de 500 m³ mais ce dernier a été construit sur un terrain d'altitude trop faible et n'est en fait pas utilisé. Le réseau est composé d'un canal principal pouvant faire circuler 40 l/s, de canaux secondaires de 20 l/s et de tertiaires de 10 l/s, le tout alimentant un périmètre de 125 ha. Le débit délivré par la pompe en 2000 était de 38 l/s.

Pour irriguer, les agriculteurs bouchent l'aval de la séguia la plus proche de leur parcelle et y disposent une rangée de siphons (voir photo ?? p. ??). Ces siphons alimentent une séguia en terre, i.e. un simple canal creusé à même le sol, qui apportera l'eau ensuite jusqu'à la parcelle : il en résulte des pertes parfois très importantes.

Le réseau est en très mauvais état (fig. A.10). Lorsque des séguias étaient cassées dans la partie proche du forage, elles furent remplacées par des séguias en aval : des secteurs entiers du périmètre se trouvent sans séguias, notamment dans la partie gauche de la figure (A.10). De plus, ponctuellement, des séguias cassées sont remplacées par des

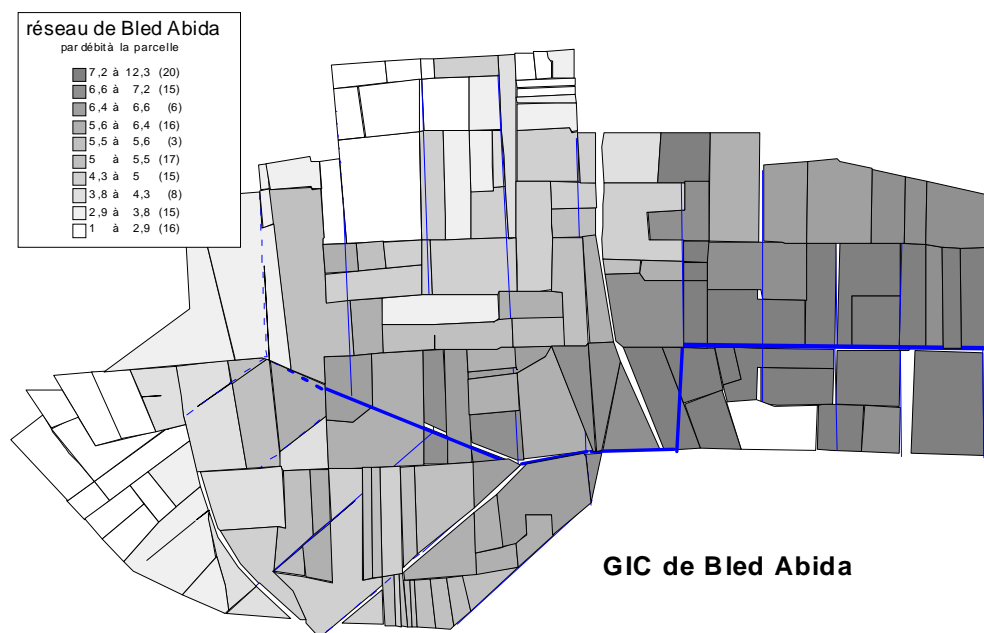


FIG. A.10 – estimation des pertes dues au réseau et aux séguias en terre à Bled Abida

tuyaux en PVC (voir photo p. ??). Enfin, de nombreuses fuites existent sur l'ensemble du réseau.

Le réseau n'est maintenant que très peu entretenu : les responsables du GIC refusent d'investir dans l'entretien puisque le CRDA promet une prochaine rénovation, mais aussi probablement parce que ces responsables ne sont pas situés sur les parties les plus éloignées du forage.

A.3.2 Pratiques culturelles

Le sol de Bled Abida est dans l'ensemble sableux, ce qui convient bien à l'olivier, beaucoup moins aux cultures maraîchères.

Depuis les débuts du périmètre à la fin des années 60, les agriculteurs ont appris à diversifier leurs cultures. Initialement les seules cultures irriguées étaient le melon et l'olivier ; désormais, les agriculteurs cultivent un large éventail de cultures : du maraîchage (melon, pastèque, corsette, piment, pomme de terre, oignon), du fourrage (sorgho) ou encore des céréales (blé, orge)(voir les figures A.12 et A.14).

Les agriculteurs de Bled Abida considèrent qu'eau et engrais sont des substituts. Dans l'ensemble, les engrais sont peu utilisés et les sols se sont beaucoup épuisés depuis 20 ans : “avant, la terre était riche, ça marchait mieux avant sans intrants que maintenant avec les intrants, la terre est devenue pauvre” affirme un agriculteur.

Les cultures faites à Bled Abida sont diversifiées et assez bien réparties pendant l'année. La figure (A.11) présente les coefficients cultureux Kc des principales cultures.

Pendant l'hiver 98-99, plusieurs types de céréales et fourrages ont été semés (fig. A.12). Les rendements sont clairement décroissants vers la partie Ouest du réseau, loin du forage (fig. A.13).

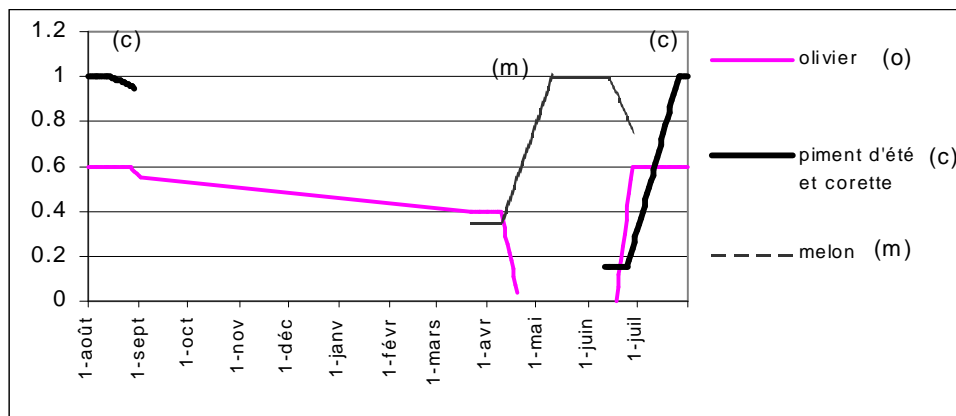


FIG. A.11 – coefficients culturaux des principales cultures utilisées à Bled Abida

La même diversité est présente l'été suivant (fig. A.14).

Suite à ces gros problèmes techniques et en attendant la rénovation du réseau, les agriculteurs ont fait évoluer leur système cultural vers moins de maraîchage et plus d'élevage par le biais des cultures fourragères (fig. A.15).

A.3.3 Caractéristiques financières

L'eau est vendue en 2000 à 62 mil/m³. Depuis l'hiver 99-2000 et pour suivre les recommandations du CRDA, l'eau n'est facturée que 50 mil/m³ pour l'irrigation des céréales. Un projet initié par le Président d'allouer 25 heures d'irrigation aux agriculteurs en bout de réseau pour un paiement de 20 heures, n'a finalement pas vu le jour. Enfin, en 1999, le solde du compte du GIC était de l'ordre de 20 000 DT.

A.3.4 La gestion de l'eau

La pompe fonctionne 20 heures sur 24 de mai à juillet. Le tour d'eau est construit au fur et à mesure par l'aiguadier ; le tour d'eau peut parfois atteindre 20 jours en juin. La figure (A.16) présente l'évolution du fonctionnement du forage pendant l'année 1998-1999.

Quatre puits ont été construits à l'intérieur du périmètre ; leurs propriétaires peuvent utiliser l'eau du périmètre mais ils ne sont pas alors prioritaires. En pratique, ces agriculteurs ne demandent pas l'eau parce que le coût d'exhaure par leur puits est bien inférieur au prix de l'eau du réseau ; cependant la capacité d'exhaure de leur puits ne permet que d'irriguer leurs propres terres : ces agriculteurs ne proposent pas leur eau à d'autres voisins.

Habituellement, de 15 à 20 contrats sont signés chaque année pour que des agriculteurs puissent irriguer des parcelles hors du périmètre. Il y a quelques années, un agriculteur ayant semé de la fève hors du périmètre a perdu toute sa récolte parce que les pastèques à l'intérieur du réseau avaient monopolisé tout le débit disponible. Depuis, le trésorier a décidé que, dès lors qu'un contrat était signé entre un agriculteur et le

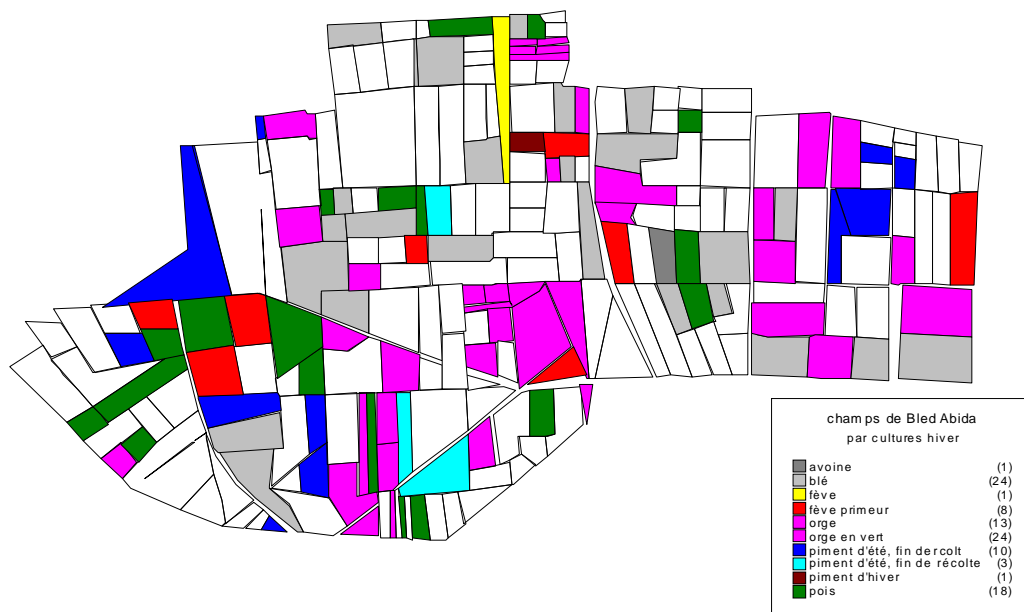


FIG. A.12 – cultures faites à Bled Abida pendant l'hiver 98-99

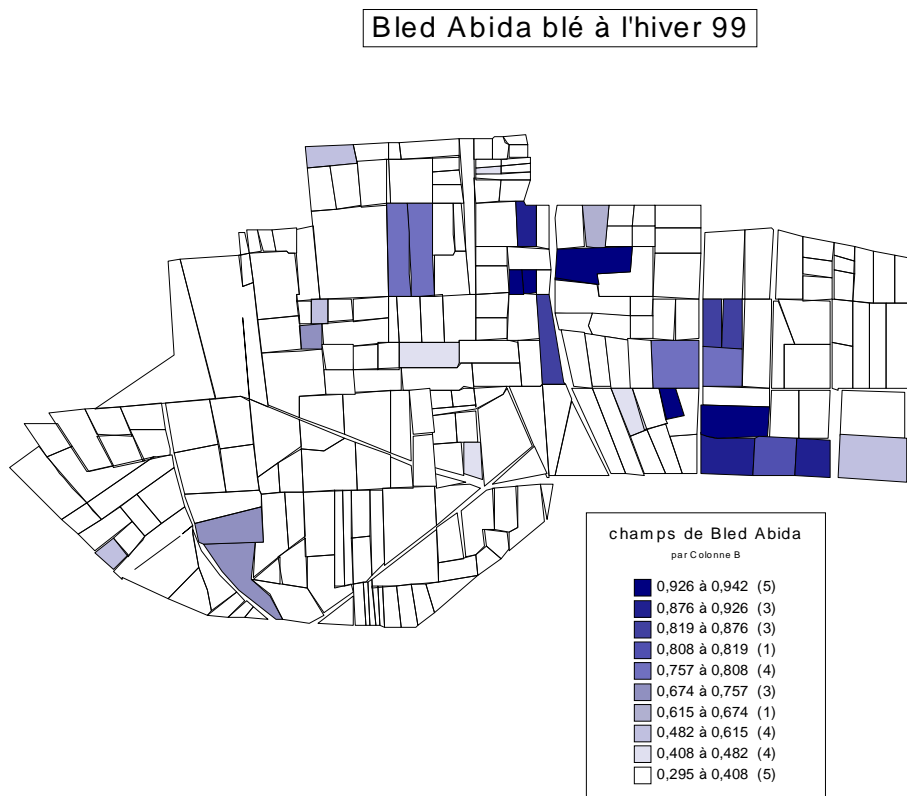


FIG. A.13 – rendement réalisé pour le blé à Bled Abida pendant l'hiver 98-99

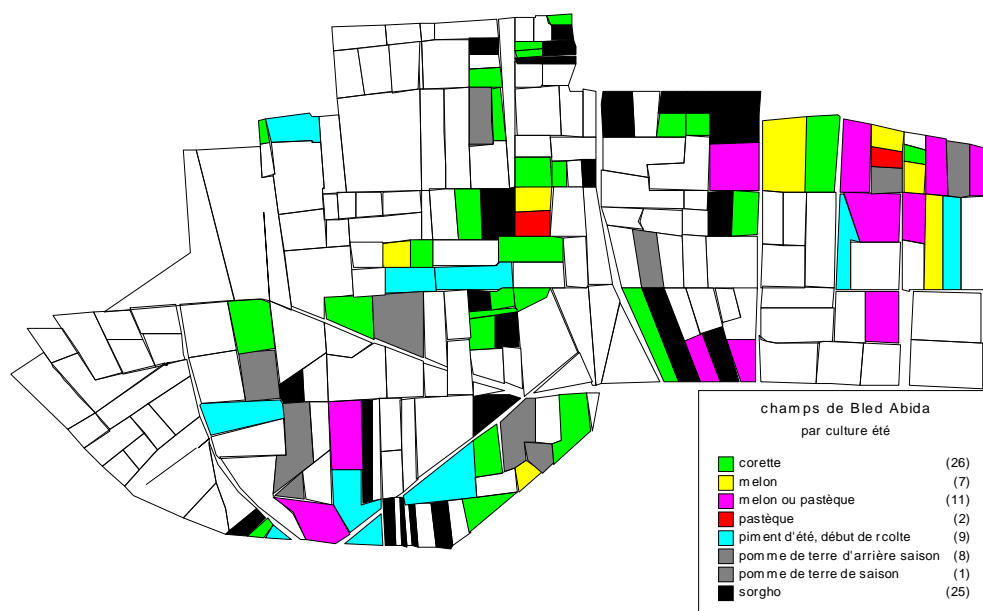


FIG. A.14 – cultures faites à Bled Abida pendant l'été 99

GIC, l'agriculteur hors du périmètre ne serait pas moins prioritaire que ceux dans le périmètre. L'application de cette règle n'est en fait pas si évidente puisque, selon ce trésorier aussi, **un agriculteur se trouvant hors du périmètre va chercher à estimer quelle surface sera cultivée en maraîchage dans le périmètre et donc quelle sera la tension sur la ressource, avant de semer hors du périmètre des cultures d'été**. De toutes façons, les tensions sur la ressource dues aux problèmes techniques récents ont fait chuter ce nombre de contrats.

La détérioration du réseau a conduit quelques agriculteurs qui possédaient une maison et des parcelles près de l'Oued Zérout (haut de la carte 11, c.f. aussi la carte 31) à vendre leurs parcelles, fermer leur maison et chercher du travail en ville. A la frontière Est du réseau (en haut à gauche de la carte 11), i.e. loin du forage, un agriculteur continue néanmoins de faire des cultures irriguées et notamment de la corette. Pour pouvoir irriguer, il doit entretenir une séguia en terre longue de l'ordre de 100 mètres. Lorsqu'il reçoit la main d'eau, cet agriculteur doit attendre 6 heures que l'eau progresse sur la séguia en terre et parvienne à sa parcelle. De plus, il estime que les pertes totales sont au moins de 50%.

A.3.5 La rénovation

Une rénovation du réseau est actuellement à l'étude. Au total, le coût de cette rénovation est de l'ordre de 3000 DT/ha. Dans le cadre de ce projet, les agriculteurs doivent signer un engagement à :

- financer 50 DT/ ha avant et après la rénovation au titre de la participation ;
- respecter le tour d'eau ;
- payer la cotisation annuelle au GIC ;
- utiliser des techniques d'économie d'eau ;

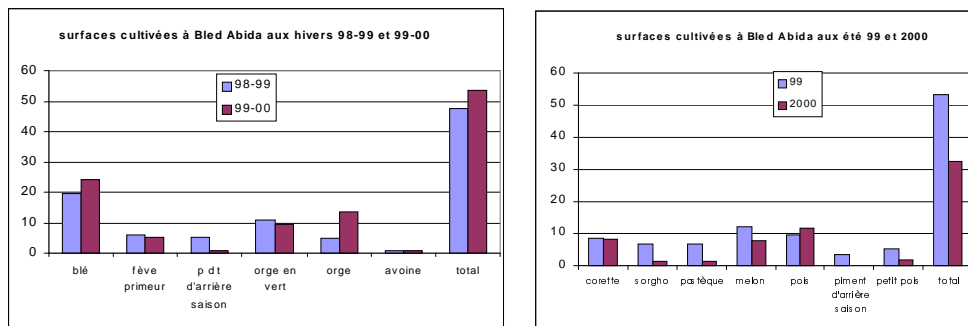


FIG. A.15 – évolution des cultures à Bled Abida entre 98-99 et 99-2000

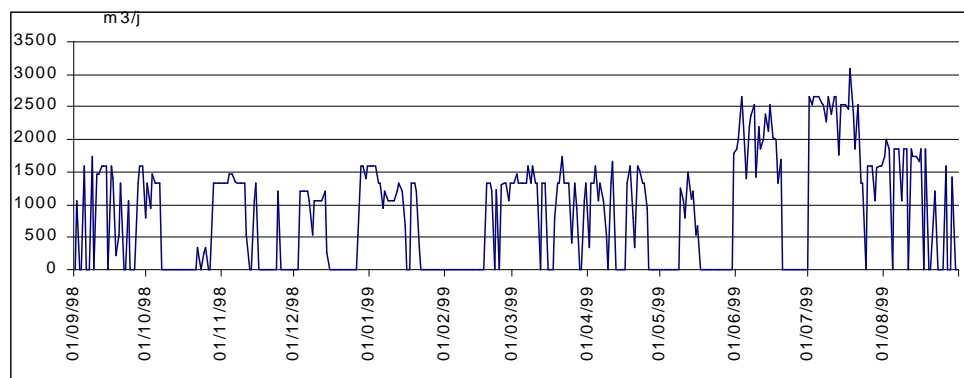


FIG. A.16 – fonctionnement du forage de Bled Abida pendant l'année 98-99

- accepter de partager les nouvelles vannes avec d'autres agriculteurs.

Les 100 DT/ha collectés seront intégralement versés sur le compte du GIC. Néanmoins, depuis que la collecte des 50 DT/ha initiaux a été mise en place à l'été 2000, seuls le Président et le Trésorier ont signé l'accord d'acceptation de ces conditions. **Le projet de rénovation est donc actuellement bloqué**, puisque le CRDA n'accepte de débiter les travaux que si le taux d'engagements signés atteint 80%.

A.4 Souaidia

Le périmètre irrigué de Souaidia se situe au Nord de Sbikha, à 30 km environ au Nord de Kairouan (il n'est pas dans la zone d'étude du projet MERGUSIE). Dans la région de Souaida, la pluviométrie annuelle moyenne est de 330 mm/an tandis que l'ETP est évaluée à 1510 mm/an dont de 200 à 300 en période estivale.

Le périmètre irrigue 120 ha cultivés par 70 exploitants.

Des puits ont fonctionné sur la zone du périmètre jusqu'en 1990, année lors de laquelle la compagnie publique de production d'eau potable (SONEDE) a creusé plusieurs forages pour alimenter en eau potable les villes du littoral : la nappe a alors baissé et les puits se sont asséchés. Le forage du périmètre de Souaidia est créé en 1991 mais l'irrigation ne commence qu'en 1994. Durant les premières années, le réseau de distribution est semblable à celui d'El Melalsa. Le réseau actuel basse pression est installé en 1998. En même temps est créé un bassin régulateur de 50 m³ au dessus du forage de façon à limiter les départs et arrêts de la pompe et à permettre à un agriculteur d'irriguer seul.

Le président du GIC est depuis 15 ans électromécanicien pour la division Grands Travaux Hydrauliques du Ministère de l'Agriculture. Il possède une compétence technique reconnue au sein du GIC.

A.4.1 Caractéristiques techniques

Le réseau est en basse pression, enterré et en bon état. La pompe prélève de l'eau à 180 m de profondeur et fournit un débit de 40 l/s.

De nombreux agriculteurs s'équipent depuis l'année dernière de bassins et de pompes individuels. Ces agriculteurs utilisent moins d'eau pour l'irrigation mais ils doivent en disposer à une fréquence plus importante. Le remplissage des bassins s'effectue donc pendant la nuit ; il faut trois heures environ pour remplir un bassin de 100 m³ avec une main d'eau de 10 litres. Le tour d'eau reste encore la règle suivie pendant la journée. Evidemment, cette moindre tension sur la ressource se traduit par une tendance à l'augmentation de la surface irriguée : la surface du périmètre a augmenté lors du remembrement (les quelques parcelles ajoutées appartenant au *omda*) et de plus certains agriculteurs irriguent leurs terres en bordure de GIC avec l'eau du réseau.

A.4.2 Caractéristiques financières

L'eau est facturée à 70 mil/m³, le calcul de la quantité d'eau prélevée se faisant à partir des compteurs volumétriques installés sur les bornes d'irrigation. A l'automne 2000, le GIC a fait la demande au gouverneur que l'Etat subventionne à 50% le prix de l'eau d'irrigation destinée aux céréales, comme il le fait par ailleurs sur les Périmètres Publics Irrigués. Le gouverneur a refusé : ce sont aux GIC de prendre en charge financièrement une telle mesure.

Enfin, le GIC dégage des bénéfices, ce qui lui permet de redistribuer 5000 DT par an en aides sociales au sein du village.

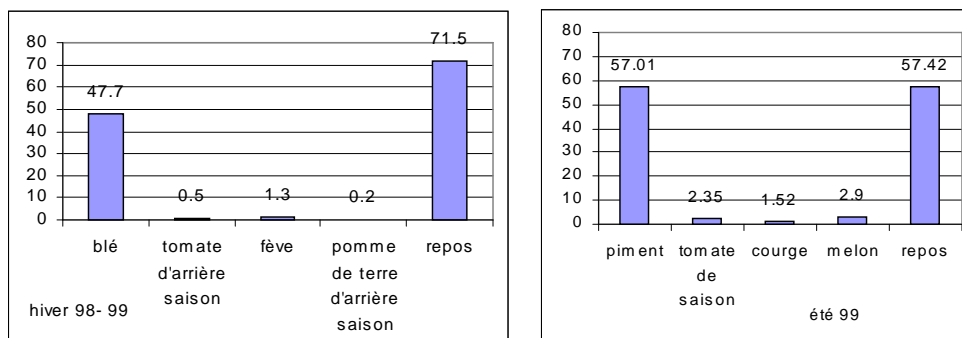


FIG. A.17 – surfaces mises en culture à Souaidia pendant l'année 98-99

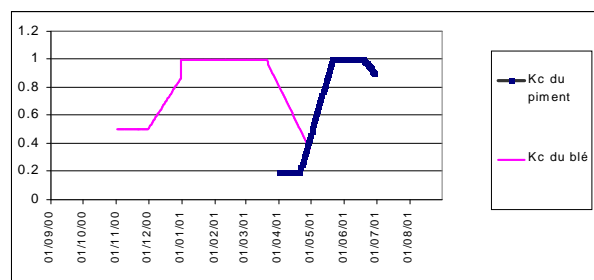


FIG. A.18 – coefficients culturaux Kc des deux principales cultures de Souaidia

A.4.3 Les pratiques culturales

L'assolement est fondé sur l'alternance piment-blé (fig. A.17). A Souaidia, le piment est planté suffisamment tardivement pour ne pas gêner les dernières irrigations du blé (fig. A.18).

En 1997, les agriculteurs ont semé pour l'essentiel du maraîchage : 6 ha seulement de culture d'hiver ont été plantés. En 1999, une campagne d'incitation ainsi que la promesse d'un coût de l'eau moitié moindre a conduit à une augmentation importante des cultures d'hiver, soit au total 70 ha.

Depuis peu les agriculteurs commencent à remplacer le piment par de la tomate, pour laquelle les charges et les besoins de main d'œuvre sont moins importants. De plus, à la suite du président, des agriculteurs tentent d'autres cultures telles que la courge ou l'oignon. Cette évolution devrait s'accroître avec la mise en place des équipements individuels d'irrigation sous pression.

A.4.4 La gestion du tour d'eau

Le réseau de Souaidia fonctionne 20 heures sur 24 pendant l'été (fig. A.4.4).

Le contrôle des surfaces mises en culture est suffisamment efficace pour que, avec un tour d'eau fixé de 10 jours, les agriculteurs réussissent à irriguer correctement à chaque passage.

Il existe actuellement 4 mains d'eau, chacune définissant un tour. Puisque les secteurs sont de tailles différentes, l'aiguadier réalise parfois de lui-même un rééquilibrage en

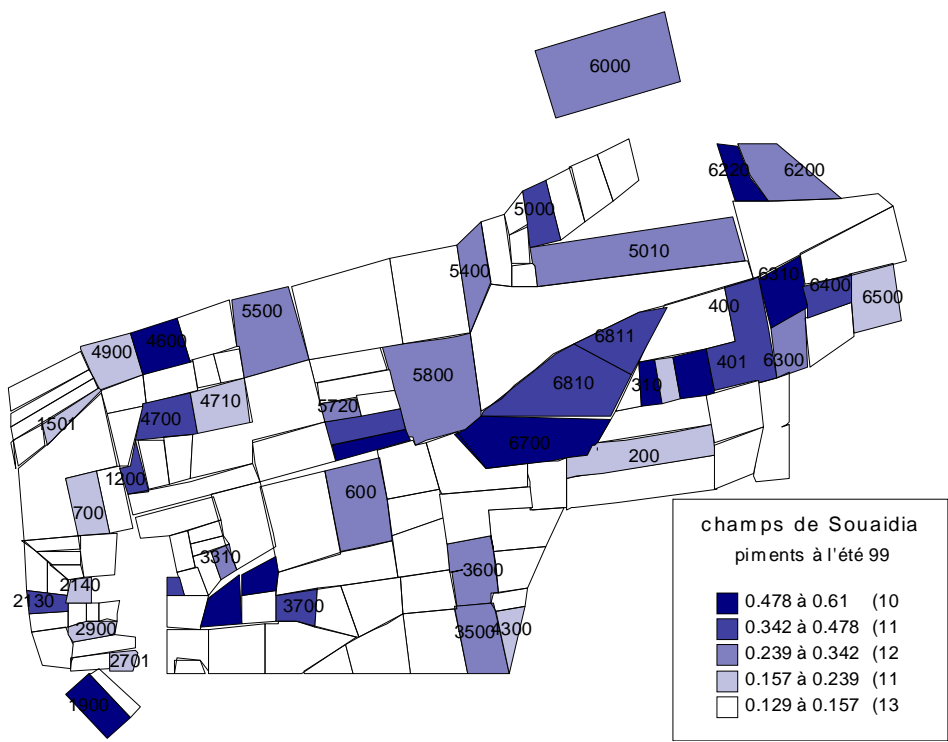


FIG. A.19 – carte des stress subis par le piment à l'été 99 à Souaidia

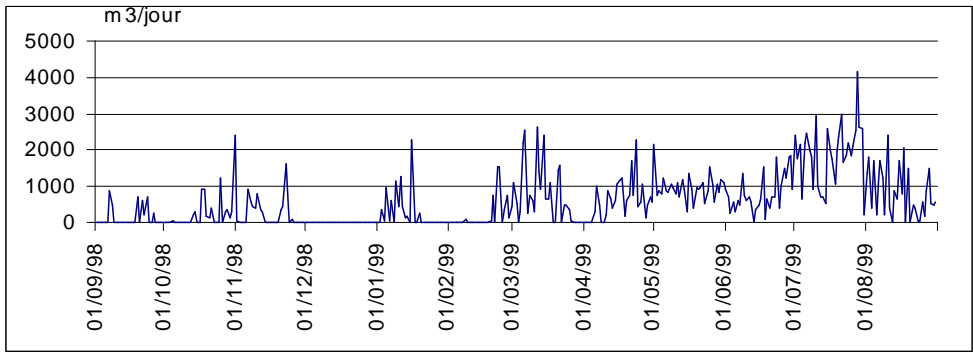


FIG. A.20 – chronique d'utilisation du forage à Souaidia pendant l'année 98-99

manœuvrant les vannes. Le tour d'eau formel arrêté en début de campagne consiste en un tableau comportant les caractéristiques suivantes : nom, surface possédée, surface en culture irriguée et enfin nombre d'heures d'irrigation.

La surface mise en culture irriguée l'été doit être inférieure au tiers de la surface possédée, sauf pour les agriculteurs possédant de petites surfaces. Quasiment tous les irrigants mettent en culture la surface maximale autorisée. L'aiguadier calcule ensuite un nombre d'heures d'irrigation nécessaires par tour d'eau à partir de la surface totale mise en culture irriguée en utilisant un coefficient de l'ordre de 480 m³/ha et par irrigation.

La durée du tour d'eau est ainsi contrôlée et elle se situe, en pratique, entre 7 et 9 jours. Puisque le réseau est en bon état, il n'y a pas de distribution particulière des stress hydriques sur l'ensemble du périmètre irrigué (A.18).

En ce qui concerne les règles de priorité entre cultures, le piment est considéré comme prioritaire sur le blé. Les récents bassins individuels peuvent s'insérer dans le tour d'eau pendant la nuit. D'une contenance faible (en général 50 m³), ils sont remplis rapidement, en deux heures, mais l'agriculteur doit lors souvent les remplir tous les 5 jours.

Certains agriculteurs proches du réseau peuvent obtenir l'eau du périmètre, mais uniquement si la demande au sein du GIC le permet. En pratique, cette irrigation hors du périmètre n'a lieu que pendant l'hiver.

Les 8 agriculteurs interrogés plus longuement que l'enquête systématique au printemps 2000 ont tous déclaré que la distribution de l'eau était organisée et satisfaisante. Pour l'un d'entre eux, le rôle des membres du Comité est avant tout de s'assurer de l'équité dans la distribution de l'eau tandis que pour un autre, c'est de planifier les surfaces et les cultures. De telles attentes précises sur le rôle des responsables du GIC n'ont pas été rencontrées à El Melalsa !

Le remembrement a eu lieu à l'hiver 99-2000 : les agriculteurs vont désormais pouvoir acquérir un "titre bleu" de propriétaire qui pourra leur donner accès à des prêts de la Banque Nationale Agricole.

A l'initiative du CRDA, un contrat d'abonnement est signé chaque année entre le GIC et les irrigants (voir p.133).

Même si les bassins sont encore peu développés à Souaidia, **la maîtrise actuelle du tour d'eau montre que le GIC a les capacités de gérer la répartition de l'eau que nécessite une irrigation sous-pression. De plus, ce GIC est aussi suffisamment expérimenté pour pouvoir débiter des activités de coopérative.**

Annexe B

Présentation de l'Adour gersois et du Gabas

Les brèves descriptions suivantes des bassins du Gabas et de l'Adour gersois ont été réalisées à partir de (Beucher, 2000a et 2000b) et de Chevallier (2001).

B.1 La partie du Gabas située dans les Pyrénées Atlantiques

Le Gabas est un affluent de l'Adour qui, pour l'essentiel, se trouve dans les départements des Pyrénées Atlantiques et des Landes. Le bassin versant total s'étend sur une superficie de 415 km². **La nappe alluviale est très faible ; par conséquent, puisque la rivière n'est pas réalimentée, le débit peut être extrêmement variable pendant la période d'étiage.**

L'étude réalisée a porté sur la partie du Gabas située dans les Pyrénées Atlantiques. Le Gabas est d'ailleurs la rivière considérée comme la plus déficitaire dans ce département (Beucher, 2000b). Dans la partie aval de ce bassin se trouve l'ASA de Boueilh-Boueilho-Lasque qui prélève à partir d'une retenue et qui, de fait, ne consomme pas l'eau de la rivière.

Sur le bassin du Gabas, l'usage agricole est de loin le plus important (302 ha irrigués), suivi par la pêche. 36 agriculteurs prélèvent dans le Gabas dans sa partie Pyrénées Atlantiques. Ils possèdent une SAU moyenne de 40 ha, et cultivent pour l'essentiel du maïs consommation irrigué sur les rives du Gabas (12 ha en moyenne) et du maïs consommation non irrigué sur les coteaux (13 ha en moyenne). De plus, 6 agriculteurs font du maïs semence et 4 font du maïs doux. Ces cultures sont souvent complétées par un élevage de vaches ou de canards.

B.2 L'Adour gersois

Dans la partie gersoise de l'Adour, 244 exploitations agricoles prélèvent dans la rivière ou dans la nappe alluviale. Chevallier (2001) propose deux types généraux d'exploitations :

- des maïsiculteurs-non viticulteurs, qui représentent 43% des exploitations. Ils sèment

plus de 60% de leur SAU en maïs, cultivent aussi des cultures sous contrat (maïs semence et doux soja), et irriguent 80% de leur SAU.

- des maïsculteurs viticulteurs, qui représentent 56% des exploitations. Ils possèdent des vignes sur les coteaux et c'est cette culture qui est prioritaire. Ils cultivent néanmoins environ 55 % de leur SAU en maïs et irriguent 70% de leur SAU.

Les sols sont soit des boubens, qui retiennent bien l'eau, soit des sols constitués de limons et de graviers, beaucoup plus filtrants.

La procédure d'autorisation de prélèvement de la campagne 2000 fait état de 134 points de prélèvement, pour un débit total de 14273 m³/h (soit 3.8 m³/s) dans la rivière et 4370 m³/h dans la nappe.

Annexe C

Sleepi : un logiciel de simulation économique à l'échelle des périmètres irrigués

Contexte et objectifs

Depuis plusieurs années, l'équipe Irrigation du Cemagref utilise une méthode de diagnostic de périmètre irrigué. Cette méthode permet de simuler les choix d'assolement des agriculteurs en fonction de scénarios tels que des changements de prix, de niveau d'apport en eau, etc. Le logiciel Sleepi (SimuLations Economiques à l'Echelle des Périmètres Irrigués) permet de **standardiser le cœur de la méthode, c'est-à-dire le passage de la base de données aux résultats de simulation économique, en intégrant en plus un modèle de bilan hydrique dans le calcul des rendements**. Il a été pour l'essentiel conçu par Mancuso, de mars à juillet 2001 (Mancuso, 2001).

Le logiciel Sleepi est initialement conçu pour modéliser la situation suivante. Un agriculteur dans un périmètre irrigué sait qu'il ne va pouvoir disposer que de 1000 m³ par décade pendant toute une année. Il doit choisir à l'automne la surface qu'il va semer en blé, et pour cela estimer aussi la surface qu'il sèmera en melon au printemps. Ces deux cultures se chevauchent au printemps : il devra pendant environ deux mois effectuer des arbitrages pour l'eau d'irrigation. L'agriculteur va estimer alors quel ensemble de surfaces en blé et en melon et quelle répartition du volume décadaire entre les deux cultures à chaque pas de temps va lui assurer le profit maximal. Il va en fait choisir de semer du melon et chercher à l'irriguer le mieux possible, mais va aussi décider de semer du blé, quitte à ne pas l'irriguer suffisamment pendant la période de chevauchement avec la culture de melon. Sleepi utilise un modèle de bilan hydrique dans le programme d'optimisation pour calculer le vecteur de choix optimal.

Fonctionnalités

L'utilisateur va entrer un ensemble de données structurées sur les cultures (intrants, produits) et les sols. De même, il va définir pour chaque agriculteur ou ensemble d'agriculteurs des champs, les variables de choix et le programme de maximisation : fonction objectif et matrice de contrainte. L'utilisateur peut utiliser avec Sleepi une base de données qui a été définie avec le logiciel Olympe. Olympe est un logiciel d'aide à la simulation financière de scénarios développé par Attonaty de l'INRA ; il s'agit d'une version améliorée du logiciel Quatre-Vents.

L'utilisateur peut décider, s'il le souhaite, d'utiliser le module de bilan hydrique dans le calcul de la fonction d'optimisation.

Sleepi retourne les résultats du programme d'optimisation. Actuellement la simulation n'est faite que pour un agriculteur, mais **il est prévu à court terme de donner la possibilité d'une simulation sur l'ensemble d'un périmètre. Ces simulations permettront alors de tester l'impact d'une règle d'allocation, voire de calculer par convergence des choix l'équilibre de Nash associé à une règle d'allocation créant des interactions stratégiques.**

Principes de modélisation

Le cœur de Sleepi est écrit en Fortran ; il est composé de deux fonctions.

La première, DONLP2, est un programme d'optimisation pouvant fonctionner jusqu'à 500 variables environ, avec aussi bien une fonction objectif que des contraintes non linéaires. Ce programme a été écrit par Spellucci de l'université de Darmstadt (Allemagne), il est disponible gratuitement sur Internet pour des activités de recherche.

La deuxième fonction est une version du logiciel Pilote écrit par Mailhol. Il s'agit d'un logiciel de bilan hydrique à trois réservoirs : la couche superficielle du sol, la plante et l'ensemble du sol.

L'algorithme d'optimisation part d'un point donné dans l'espace des variables (surfaces et volumes par exemple). En ce point, connaissant les surfaces et les volumes, l'algorithme peut calculer des rendements réalisés et donc la valeur de la fonction objectif. Il calcule ensuite un gradient et se déplace de proche en proche dans l'espace déterminé par les contraintes vers la solution optimale.

Ce cœur en Fortran est appelé par une superstructure, écrite, elle, en Java par Mancuso et Fayssse.

Utilisation

Ce logiciel s'adresse à des personnes connaissant les techniques d'optimisation sous contraintes. La complexité de la modélisation associée empêche son utilisation directe auprès d'irrigants. En revanche, il peut constituer, avec le logiciel Olympe, un ensemble intéressant. L'utilisateur pourra d'abord utiliser Olympe pour décrire des scénarios simples et discuter avec les irrigants, puis de son côté, avec la même base de données, faire des calculs d'optimisation comprenant ou non une intégration du bilan hydrique.

Un aller-retour entre les deux logiciels permettra, en comparant les simulations aux discours des irrigants, de mieux comprendre les raisons de leur choix et de proposer d'autres scénarios.

Table des matières

Introduction	8
Un premier tour d'horizon	11
0.1 Du constat de pénurie d'eau à la négociation sur les règles d'allocation	11
0.2 Les différentes mesures de l'eau allouée	14
0.2.1 L'allocation en temps	14
0.2.2 L'allocation en volume	14
0.2.3 L'allocation en débit	15
0.2.4 Combinaisons des précédentes mesures de l'eau allouée	16
0.2.5 L'allocation pluriannuelle	16
0.2.6 Conclusion	17
0.3 Les enjeux pour la gestion de l'eau abordés	17
0.4 Présentation des deux terrains d'étude	25
0.4.1 Des associations d'irrigants en Tunisie centrale	25
0.4.2 Le bassin de l'Adour en France	32
1 Question initiale de la thèse et voisinages théoriques	36
1.1 La question initiale	37
1.2 Position par rapport à l'analyse des ressources en bien commun	38
1.2.1 Qu'est-ce qu'une ressource en bien commun ?	38
1.2.2 Quelles spécificités des problèmes d'externalité des RBC par rapport à ceux des biens publics ?	42
1.2.3 Rendre compte de la coopération avec des modèles de jeux non coopératifs	44
1.2.4 La négociation sur les règles de gestion des RBC	56
1.2.5 Dans quelle mesure les modèles de théorie des jeux rendent-ils compte des comportements observés ?	58
1.2.6 Apport de l'analyse économique sur le débat autour des RBC	58
1.2.7 Conclusions et perspectives de recherche	61
1.3 Position par rapport à l'analyse des instruments de gestion de l'eau	62
1.4 Liens avec la théorie des choix publics	63
1.5 Un plan de travail	63
1.6 Approche formelle du problème dans le cas d'une méconnaissance des caractéristiques individuelles	66
1.6.1 Choix de surface irriguée pour un agriculteur seul	67
1.6.2 Le programme de la collectivité	68
1.7 Utiliser la théorie des jeux ?	71

2 Répartir l'eau entre des agriculteurs qui la valorisent différemment	73
2.1 L'allocation optimale	76
2.2 Lorsque le Gestionnaire ne connaît pas les capacités individuelles à valoriser l'eau	77
2.2.1 Lorsque le Gestionnaire connaît la distribution sur les capacités individuelles	78
2.2.2 Lorsque le Gestionnaire n'a aucune information sur les capacités individuelles	80
2.2.3 Allocation <i>ex ante</i>	81
2.2.4 Allocation <i>ex post</i> sans mutualisation du profit	81
2.2.5 Allocation mixte entre <i>ex ante</i> et <i>ex post</i>	83
2.2.6 Allocation <i>ex post</i> avec mutualisation du profit	83
2.2.7 Application avec une fonction de rendement de forme racine carrée	84
2.2.8 Équité des règles d'allocation	87
2.3 Application au périmètre irrigué d'El Melalsa	90
2.3.1 Simulation de différentes règles d'allocation	91
2.3.2 Comparaison	94
2.4 Des compléments aux règles pour les rendre plus efficaces	95
2.4.1 Réallocation informelle après une allocation <i>ex ante</i>	95
2.4.2 Contrôle de surfaces mises en culture avant l'allocation <i>ex post</i> .	96
2.5 Conclusion	97
2.6 Annexes du chapitre 2	98
3 Partager le risque par le biais de l'allocation en eau ?	112
3.1 Un modèle et des critères d'évaluation	117
3.1.1 Cas d'un agriculteur seul	117
3.1.2 Allocation optimale	119
3.1.3 Indépendance des agriculteurs pour les choix d'assolement . . .	120
3.1.4 Critères d'évaluation	121
3.1.5 Les différentes règles d'allocation étudiées	121
3.2 Des règles d'allocation sans assurance extérieure	123
3.2.1 Une allocation de l'eau de type <i>ex ante</i>	123
3.2.2 Une allocation de l'eau de type <i>ex post</i> associée à une tarification au volume ou un marché	126
3.2.3 Utilisation d'une fonction de production hyperbolique	128
3.2.4 Des droits de priorité entre usagers	130
3.2.5 Taxe à la surface couplée à une allocation <i>ex post</i>	131
3.3 Des assurances extérieures au système irrigué	132
3.3.1 Assurance sur le rendement	132
3.3.2 Assurance sur le revenu	134
3.3.3 Assurance par zone	135
3.3.4 Différents contrats ?	135
3.4 Evaluation des règles selon les critères prédéfinis	136
3.5 Applications sur l'Adour et en Tunisie	138
3.5.1 Des usages hétérogènes sur l'Adour	138
3.5.2 Prises de risque individuelles et collectives dans les GIC tunisiens	140
3.6 Conclusion	143

3.7	Conclusion sur les règles qui créent des interdépendances dans le cas d'une méconnaissance des caractéristiques individuelles	145
3.8	Annexes du chapitre 3	146
3.8.1	Données techniques des simulations effectuées sur les GIC	151
4	Lorsque le coût de vérification de l'allocation est important	153
4.1	Les règles de gestion de l'eau utilisées sur l'Adour et le Gabas	159
4.2	Evaluation du suréquipement et de l'irrigation stratégique	160
4.2.1	Le suréquipement stratégique	160
4.2.2	L'irrigation stratégique	162
4.3	Un modèle pour l'irrigation stratégique	162
4.3.1	Déroulement du jeu	164
4.3.2	Utilité de l'agriculteur	164
4.3.3	Résolution du jeu	167
4.4	Analyse de la situation actuelle	168
4.4.1	Modélisation initiale de l'irrigation stratégique	168
4.4.2	Impact de l'hétérogénéité	170
4.5	Un mécanisme optimal pour des irrigants identiques et une information parfaite	170
4.6	Différents scénarios envisageables	171
4.6.1	Quota volume à la campagne	172
4.6.2	Quota volume à la semaine	172
4.6.3	Diminuer le nombre d'agriculteurs concernés par un point de mesure	174
4.6.4	Coût d'acquisition de l'information	175
4.7	Conclusion	175
4.8	Annexes du chapitre 4	177
5	Synthèse des approches et ouvertures théoriques	179
5.1	Synthèse des différentes approches étudiées	180
5.2	Prise en compte de la contrainte de production de l'eau	181
5.3	De la souplesse dans le système : allocations informelles et renégociations	186
5.4	Pourquoi observe-t-on des règles de type <i>ex post</i> ?	188
5.5	Quel impact de l'existence systématique d'une marge de manœuvre sur la bonne structure de gestion ?	188
5.5.1	Une nécessaire participation à la décision d'une instance de négociation regroupant tous les usagers	189
5.5.2	Connaître l'impact des règles envisagées lors d'une négociation : les usagers doivent tous disposer d'une capacité d'expertise	193
5.5.3	La présence nécessaire de l'Etat dans de nombreux cas	194
5.5.4	Définir dès le départ une instance de renégociation	196
5.5.5	Vers une société hydraulique ?	197
5.6	Conclusion	197
6	Retour sur les terrains d'étude : quelques propositions	199
6.1	En Tunisie	200

6.1.1	Quel potentiel de gain entre changement des règles et changement du réseau ?	200
6.1.2	Une rénovation vers un réseau en haute pression ou en basse pression ?	201
6.1.3	Le GIC : un bon niveau de décentralisation	201
6.1.4	Quelques propositions	202
6.2	Dans le bassin de l'Adour	203
Conclusion		206
Bibliographie		211
Liste des tableaux		222
Table des figures		224
Abréviations		228
Glossaire		229
Index		233
Annexes		233
A	Description des trois périmètres irrigués tunisiens	234
A.1	Méthode générale d'analyse	234
A.1.1	A) Diagnostic du fonctionnement réel	235
A.1.2	B) Simulation de scénarios	235
A.2	El Melalsa	237
A.2.1	Caractéristiques techniques du périmètre	237
A.2.2	Finances du GIC	238
A.2.3	Pratiques culturelles	238
A.2.4	La gestion du tour d'eau	239
A.2.5	Ordre de priorité entre cultures	240
A.2.6	Bilan de la gestion de l'eau pendant l'année 98-99	240
A.3	Bled Abida	246
A.3.1	Caractéristiques techniques du périmètre	246
A.3.2	Pratiques culturelles	247
A.3.3	Caractéristiques financières	248
A.3.4	La gestion de l'eau	248
A.3.5	La rénovation	250
A.4	Souaidia	252
A.4.1	Caractéristiques techniques	252
A.4.2	Caractéristiques financières	252
A.4.3	Les pratiques culturelles	253
A.4.4	La gestion du tour d'eau	253

B	Présentation de l'Adour gersois et du Gabas	256
B.1	La partie du Gabas située dans les Pyrénées Atlantiques	256
B.2	L'Adour gersois	256
C	Sleepi : un logiciel de simulation économique à l'échelle des périmètres irrigués	258
	Table des matières	260
	Résumé	265

Résumé

Sur les systèmes irrigués qui font face à une pénurie en eau, les règles d'allocation de l'eau laissent souvent un espace de choix aux agriculteurs irrigants, que ce soit en termes de surface mise en culture, de matériel d'irrigation ou de conduite de l'irrigation en cours de campagne. De plus, bon nombre de ces règles créent des interdépendances entre les irrigants.

La thèse compare de façon générale différentes règles d'allocation et de taxation lorsqu'on prend en compte les marges de manœuvre dont disposent les irrigants.

D'une part, la thèse étudie l'efficacité des règles créant une interdépendance, dans le cas où le coût d'acquisition de l'information sur une caractéristique des irrigants est prohibitif : ce peut être la capacité à valoriser l'eau ou l'aversion au risque. Les règles créant une interdépendance permettent de révéler de façon indirecte cette caractéristique, mais elles engendrent aussi par là même un sur-assolement. Ces règles permettent en fait un partage efficace du risque et peuvent aboutir à une bonne production collective lorsque les agriculteurs diffèrent dans leur capacité à valoriser l'eau ; en revanche, ces règles ne seront considérées comme équitables que dans certains cas.

D'autre part, quand le coût d'audit du respect des allocations est important, il est possible de mesurer les comportements des agriculteurs de façon agrégée : la baisse de coût correspondante doit être mise en regard avec l'inefficacité des interdépendances qu'engendre une telle agrégation.

Ces questions sont appliquées sur deux terrains d'étude : de petits périmètres irrigués en Tunisie centrale gérés par des associations d'irrigants, et le bassin de l'Adour dans le Sud-Ouest de la France, où la culture intensive du maïs provoque des tensions sur la ressource pendant l'été.

Mots clés : Allocation de l'eau - Ressources en Bien Commun - Equilibre de Nash - Partage du risque

Abstract

Water allocation rules used on water scarce irrigation systems often let farmers make some choices, either on the extent of cropped areas, on irrigation equipment or on irrigation scheduling. Moreover, many rules create some interdependence between farmers.

The thesis compares different water allocation rules and taxes when these rooms to manoeuvre are taken into account.

First, the thesis evaluates the efficiency of rules creating interdependencies, in the case of a prohibitive cost of information about a farmers' characteristic, which may be the capacity to valorize water or risk aversion. Rules creating interdependencies can be used to reveal this characteristic, but they also lead to an over-cropping situation. These rules can share risk efficiently, can valorize correctly water when farmers differ regarding their capacity to valorize water ; but they can rarely meet equity objectives.

Then, when the cost of water diversion audit is no longer negligible, the control can be based on an aggregation of farmers actions : the corresponding decrease in information costs must be compared to the inefficiencies of strategic interactions generated by such an aggregation. These questions are applied on two field studies : small scale irrigation schemes in Central Tunisia managed by farmers associations and the Adour River Basin in South West of France, where intensive maize culture creates water scarcity problems during summer.

Keywords : Water Allocation - Common Pool Resources Management - Nash Equilibrium - Risk Pooling